



Análisis de la seguridad energética en Colombia desde la cadena de suministro del gas natural.

Marylone Montoya Torres

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas
Departamento de Ciencias de la Computación y de la Decisión
Medellín, Colombia
2018

Análisis de la seguridad energética en Colombia desde la cadena de suministro del gas natural.

Marylone Montoya Torres

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título
de:

Magíster en Ingeniería – Sistemas Energéticos

Directora:

Yris Olaya Morales, Ph.D.

Línea de Investigación:

Mercados de energía

Grupo de Investigación:

Ciencias de la Decisión

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas

Departamento de Ciencias de la Computación y de la Decisión

Medellín, Colombia

2018

*“Quiero conocer los pensamientos de Dios; lo
demás son detalles”*

Albert Einstein

Agradecimientos

Quiero agradecer a:

La Universidad Nacional y a la Facultad de Minas por la asignación de la beca, la cual me permitió tener una nueva experiencia académica.

A mis profesores por compartir sus conocimientos.

A la profesora Yris Olaya, por su valioso tiempo y ser una guía en todo este proceso.

A mis padres, mis hermanos y a Laura Sofía por siempre estar presentes.

A mi amado esposo Alejandro, por apoyar y acompañar mis sueños.

Resumen

En este estudio se analiza el estado de la Seguridad Energética en la cadena del suministro del gas natural en Colombia. La seguridad energética se define en cuatro dimensiones: Disponibilidad, Asequibilidad, Accesibilidad y Aceptabilidad. Se usaron ocho indicadores básicos para definir cada una de las etapas del suministro, los cuales se clasificaron en cada una de las dimensiones mencionadas y se utilizaron para calcular el índice de desbalance para el periodo 2010-2016. Se encontró que 2012 fue el año de mayor desbalance debido a la baja accesibilidad del G.N y al bajo rendimiento económico. Mientras que el 2013 fue el año de mayor balance impulsado por el aumento del consumo y demanda del energético. Con el fin de modelar las relaciones entre los indicadores básicos que definen la cadena del suministro, se propone un modelo de dinámica de sistemas que permite analizar la evolución de la Seguridad Energética en el sector GN en el periodo 2015-2050, teniendo en cuenta proyecciones oficiales recientes. De acuerdo con los resultados del modelo, continúa el deterioro de la seguridad energética, debido principalmente a que la disminución de las reservas de gas natural y de la producción interna, llevan a aumentar importaciones y los precios internos del energético.

Palabras clave: Indicadores de Seguridad energética, cadena de suministro de gas natural, índice de desbalance, dinámica de sistemas.

Abstract

This study analyzes the state of Energy Security in the supply chain of natural gas in Colombia. Energy security is defined in four dimensions: Availability, Affordability, Accessibility and Acceptability. Eight basic indicators were used to define each of the stages of supply, which were classified in each of the mentioned dimensions and were used to calculate the imbalance index for the period 2010-2016. It was found that 2012 was the year of greatest imbalance due to the low accessibility of G.N and the low economic performance. While 2013 was the year of greatest balance driven by the increase in energy consumption and demand. In order to model the relationships between the basic indicators that define the supply chain, a system dynamics model is proposed that allows analyzing the evolution of Energy Security in the GN sector in the period 2015-2050, which considers recent official projections. According to the results of the model, the deterioration of energy security continues, mainly due to the fact that the reduction of natural gas reserves and domestic production lead to increased imports and domestic energy prices.

Keywords: Energy security indicators, natural gas supply chain, unbalance index, systems dynamics.

Contenido

	Pág.
1. Objetivos y Metodología	5
1.1 Motivación	5
1.2 Preguntas de discusión	8
1.3 Definición problema de investigación	9
1.4 Hipótesis de investigación	10
1.5 Objetivos	10
1.5.1 Objetivo general.....	10
1.5.2 Objetivos específicos	10
1.6 Alcance y aportes.....	10
1.7 Metodología de trabajo.....	11
1.8 Organización del documento	13
2. Conceptos de seguridad energética	15
2.1 Definición de seguridad energética	15
2.2 Dimensiones de seguridad energética.....	18
2.3 Medición de la seguridad energética	22
2.3.1 Indicadores	23
2.3.2 Índices	25
2.4 Modelos de seguridad energética.....	28
2.5 Conclusiones.....	35
3. Indicadores e índice de seguridad energética en la cadena de suministro del gas natural en Colombia	37
3.1 Metodología	37
3.1.1 Definición de Indicadores.....	37
3.1.2 Índice de desbalance	38
3.2 Indicadores de S.E para Colombia	40
3.3 Índice de desbalance para la cadena de suministro del gas natural en Colombia	49
3.3.1 Cálculo	49
3.3.2 Influencia de indicadores en el índice de desbalance	56
3.3.3 Consideraciones acerca del índice de desbalance	58
3.4 Conclusiones.....	59
4. Modelo de seguridad energética para la cadena de suministro del gas natural en Colombia.....	61
4.1 Dinámica de sistemas	61
4.2 Metodología	65
4.2.1 Definir el problema.....	65

4.2.2	Elaborar un modelo conceptual o una hipótesis dinámica	66
4.2.3	Formular un modelo de simulación.....	66
4.2.4	Probar el modelo	66
4.2.5	Implementar políticas, modelar y evaluar	67
4.3	Formulación del modelo.....	68
4.3.1	Definición del problema	68
4.3.2	Hipótesis dinámica	69
4.3.3	Formulación del modelo	78
4.3.4	Pruebas al modelo	83
4.3.5	Resultados	84
4.3.6	Índice de Desbalance (Pronóstico).....	88
4.3.7	Análisis de sensibilidad	90
4.3.8	Diseño y evaluación de políticas	96
4.4	Conclusiones	96
5.	Conclusiones y recomendaciones	99
5.1	Metodología	99
5.2	Resultados.....	100
5.3	Recomendaciones	101

Lista de figuras

	Pág.
Figura 2-1: Resultados obtenidos en Web of Science de documentos relacionados a "Energy Security" Definition.....	16
Figura 2-2: Búsqueda de documentos relacionados a "Energy Security" en bases de datos.	18
Figura 2-3: Resumen de las principales palabras claves en documentos científicos relacionados con la seguridad energética.....	20
Figura 2-4: Áreas del conocimiento de los estudios que tratan la seguridad energética.	21
Figura 2-5: Métodos de construcción de un índice de S.E:.....	26
Figura 3-1: Ejemplo de construcción de matriz de indicadores primarios.....	38
Figura 3-2: Indicadores primarios (en rojo) para la cadena de suministro del gas natural en Colombia.	48
Figura 3-3: Relación de los indicadores primarios de la cadena de suministro del gas natural con las dimensiones de Seguridad Energética (4 A's).	49
Figura 3-4: Histórico de la dimensión de Disponibilidad.....	51
Figura 3-5: Valores normalizados históricos de la dimensión de Accesibilidad.	52
Figura 3-6: Asequibilidad con datos normalizados para el periodo 2010-2016.	53
Figura 3-7: Datos normalizados de Aceptabilidad.....	53
Figura 3-8: Valores históricos de las dimensiones y caso ideal.	54
Figura 3-9: Índice de desbalance: Cadena de suministro del G.N en Colombia (2010-2016).....	55
Figura 3-10: Resultados de indicadores primarios (normalizados) y el I.D.....	56
Figura 4-1: Conceptos generales de Dinámica de Sistemas.....	63
Figura 4-2: Ejemplo de variables de flujo, nivel y auxiliares.	64
Figura 4-3: Estructura básica en la cual existen todas las decisiones.....	65
Figura 4-4: Diagrama causal Reservas-Producción.....	71
Figura 4-5: Diagrama causal del transporte de gas natural.....	72
Figura 4-6: Diagrama causal de la oferta de gas natural.	73
Figura 4-7: Diagrama causal de exploración y costos.....	75
Figura 4-8: Módulos que componen el modelo de la cadena de suministro.....	79
Figura 4-9: Balance energético del G.N en Colombia.	82
Figura 4-10: Resultados del módulo de transporte ante un aumento no pronosticado de demanda.	84
Figura 4-11: Indicadores de disponibilidad de gas natural.	85
Figura 4-12: Congestión de infraestructura de transporte 2015-2050.	85

Figura 4-13: Resultado de indicadores de la asequibilidad.....	86
Figura 4-14: Indicadores para definir aspectos de Aceptabilidad.....	87
Figura 4-15: Clasificación de los indicadores utilizados para el pronóstico del I.D	88
Figura 4-16: Dimensiones de S.E (2015-2050)	89
Figura 4-17: Índice de desbalance calculado con los resultados del modelo de la cadena del suministro.....	89
Figura 4-18: Comportamiento de la producción y del volumen importado cuando se varían las reservas iniciales.	91
Figura 4-19: Variación del precio unitario y de la producción cuando se mejora el factor de recobro.....	92
Figura 4-20: Comportamiento de la demanda y demanda no atendida con variación en la elasticidad.....	93
Figura 4-21: Volumen importado cuando se aumenta o reduce el porcentaje entregado al gasoducto colombiano.	94
Figura 4-22: Inversiones en el sector al reducir el riesgo en la inversión.....	95
Figura 4-23: Escenario de cero importaciones.	95

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1: Metodología de trabajo	11
Tabla 2-1: Indicadores de S.E obtenidos de la literatura.	24
Tabla 2-2: Índices utilizados para cuantificar la S.E	27
Tabla 2-3: Modelos utilizados en la literatura para evaluar la S.E.	28
Tabla 2-4: Clasificación en la cadena de suministro de las referencias bibliográficas que usan modelos de S.E.	32
Tabla 3-1: Revisión bibliográfica para identificar indicadores de seguridad energética. .	40
Tabla 3-2: Indicadores de seguridad energética predefinidos para la cadena de suministro del gas natural en Colombia	44
Tabla 3-3: Matriz 12X12 utilizada para la selección de indicadores primarios de la cadena de suministro de gas natural en Colombia	46
Tabla 3-4: Valores históricos y normalizados de los indicadores primarios (2010-2016).50	
Tabla 3-5: Promedio anual de cada dimensión.	51
Tabla 3-6: Área del rombo e índice de desbalance para el periodo 2010-2016.....	54
Tabla 4-1: Valores pronosticados para la demanda en el periodo 2030-2050	77

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
<i>Mpc</i>	Mega pies cúbicos	m ³	1*10 ⁶ pie cúbicos
<i>Gpc</i>	Giga pie cúbicos	m ³	1*10 ⁹ pie cúbicos
<i>pc</i>	Pie cúbico	m ³	0.0283168 m ³
<i>t</i>	Toneladas	Kg	1*10 ³ Kg

Abreviaturas

Abreviatura	Término
ASEAN	Association of Southeast Asian Nations
BP	British Petroleum
CIDET	Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Sector Eléctrico
CREG	Comisión de regulación de energía y gas
c.u	Costo unitario
D.S	Dinámica de Sistemas
EAPI	Energy Architecture Performance Index
EOR	Enhanced Oil Recovery
G	Giga (1*10 ⁹)
G.N.	Gas Natural
G.N.C	Gas Natural Comprimido
G.N.L	Gas Natural Licuado
GLP	Gas Licuado de Petróleo
IAEA	International Atomic Energy Agency
I.D	Índice de Desbalance
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
IEA	International Energy Agency
K	Miles (1*10 ³)
KBPD	Miles de Barriles por día
M	Mega (1*10 ⁶)
m ³	Metros cúbicos
MOSES	Model of Short-term Energy. Security
Mpcd	Mega pies cúbicos diarios
MinMinas	Ministerio de Minas y Energía
NCI	Nelson Complexity Index
PDVSA	Petróleos de Venezuela, S.A.
PEN	Plan Energético Nacional
PIB	Producto Interno Bruto

Abreviatura Término

<i>RESI</i>	Renewable Energy Security Index
<i>S.E</i>	Seguridad Energética
<i>S.N.T</i>	Sistema Nacional de Transporte
<i>TOS</i>	Tree of Science
<i>UPME</i>	Unidad de Planeación Minero-Energética
<i>U. E</i>	Unión Europea
<i>U.M</i>	Unidad Monetaria
<i>WEC</i>	World Energy Council

Introducción

En el siglo XXI el uso de las fuentes energéticas para el consumo ha sido uno de los temas prioritarios en la agenda internacional. El suministro de energía para satisfacer las necesidades de la sociedad está limitado entre otros factores, por el difícil acceso o la limitada disponibilidad de fuentes fósiles, el manejo peligroso y bélico de fuentes como el uranio, o la contaminación ambiental desde los diferentes sectores de consumo. Es ahí cuando aparece la idea de Seguridad Energética (S.E) para apoyar la evaluación continua de los procesos, el balance entre las fortalezas y debilidades de los sistemas energéticos y, la observación y desarrollo de las metas propuestas.

El plan energético para Colombia (UPME, 2015c) tiene en cuenta las tendencias energéticas internacionales, aspectos macroeconómicos propios y las proyecciones de crecimiento desde los diferentes sectores productivos para fijar los objetivos energéticos para el 2050. Particularmente se ha incluido como política energética de largo plazo lograr el abastecimiento interno y externo de energía de manera eficiente, buscando mejorar la seguridad. Sin embargo, en el corto plazo la confianza en el sector puede verse afectada por el agotamiento de importantes fuentes de energía como el petróleo y el gas natural, como consecuencia de la creciente demanda interna de energía. La generación eléctrica por fuentes hídricas también se muestra vulnerable en periodos prolongados de sequía y la interrupción adrede del abastecimiento de combustibles por daños en la infraestructura de transporte representa una debilidad para el sistema. Si bien existe una visión para el desarrollo del sector energético aún no hay estructurado un plan de acción concertado para alcanzar el objetivo principal y también hay una falta de previsión de eventos que deterioran el estado de la seguridad energética. En general, la estructuración de las políticas energéticas nacionales aún no tiene en cuenta a la S.E como elemento clave para enlazar coherentemente estrategias y alcanzar los objetivos cuando se presenten los escenarios contemplados.

En la literatura aparecen unos pocos trabajos de apoyo a las políticas internas y que ayuden a la construcción del concepto. Por ejemplo, Villada & Olaya (2011) modelan el transporte de gas natural y su influencia en el mercado interno y, aunque se hace la evaluación de dos de las etapas de la cadena del suministro del gas natural, no se tuvo como objetivo determinar el grado de S.E. Mientras que UPME & CIDET (2017) proponen que el concepto de S.E en Colombia debe satisfacer las necesidades energéticas de forma confiable, accesible, asequible y, aceptable social y ambientalmente. Sin embargo, proponen indicadores de S.E los cuales son clasificados en dimensiones diferentes (Resiliencia, Robustez y Soberanía) a las sugeridas como base para el desarrollo de la S.E. Además, en el estudio no se presentan resultados para el caso colombiano.

Muchos países han valorado la S.E propia, permitiéndoles sincronizar las acciones y las políticas para mantener de acuerdo con cada caso, un buen nivel de S.E. Algunos se han presentado como casos de estudio en la literatura, por ejemplo, para la República de Corea se evalúa la mejoría de la S.E al aplicar diferentes escenarios de utilización de la energía nuclear y el posterior impacto sobre el suministro y la demanda energética (Kim, Shin, & Chung, 2011). Las metas de largo plazo para la Unión Europea se han fijado bajo dos perspectivas: económica y medio ambiental. Se reconoce la implementación de energías renovables como estrategia para disminuir las emisiones de CO₂, pero para mantener la eficiencia en la generación eléctrica, es necesario que la energía nuclear permanezca en el mix energético de la región (deLlano-Paz, Martínez Fernandez, & Soares, 2016). Por su parte en China se proponen estrategias para fortalecer la S.E, entre las que se encuentran la diversificación de las fuentes energéticas extranjeras, el control del consumo y el aumento de la producción energética nacional (Su et al., 2017).

Los anteriores casos de estudio pueden servir de guía o ejemplo para plantear la evaluación de la S.E en Colombia. Sin embargo, esto debe hacerse con especial cuidado, dado que cada país cuenta con características propias, como el mencionado caso de China, del cual se puede decir que a diferencia de Colombia tiene mayores requerimientos energéticos, el abastecimiento de petróleo y gas natural se logra a través de la importación y las políticas se enfocan en ejes particulares de consumo y suministro.

Los sistemas energéticos de los países son complejos y a la vez dinámicos, dado que están involucrados directamente con la conservación y el desarrollo de la sociedad. Por

esto, en este trabajo se estudia la S.E en la cadena de suministro del gas natural combinando múltiples dimensiones e indicadores y se estudian las relaciones dinámicas entre los distintos indicadores que definen cada una de las etapas de la cadena de suministro, para así obtener una valoración particular y conjunta del sistema.

El documento se ha estructurado de la siguiente manera: En el capítulo 1 se presentan cifras del consumo mundial de energía primaria, la cual permite incluir en la agenda el concepto de seguridad energética como elemento principal para la valoración de los sistemas energéticos. A su vez la importancia del gas natural de origen fósil, el cual permite la transición de carbón a energías renovables, éstas se han tornado más populares porque se considera tienen menor impacto ambiental. Por su parte, las calificaciones de S.E de Colombia han sido de buen rendimiento (Wang & Zhou, 2017) y sostenibilidad (WEC, 2016). Sin embargo, estos índices desconocen el panorama de desabastecimiento de gas natural que está próximo a ocurrir en el país. Lo que hace necesario la autoevaluación de la seguridad energética, como herramienta para identificar las principales falencias del sector y facilitar elementos para la toma de decisiones. En el capítulo se proponen cinco objetivos, los cuales se irán desarrollando a lo largo del documento con el fin de alcanzar un objetivo general: Analizar la seguridad energética en el largo plazo para el gas natural en Colombia teniendo en cuenta la cadena de suministro.

En el capítulo dos se presentan las diferentes definiciones y perspectivas del concepto de Seguridad Energética. También los diferentes métodos de medición utilizados en la literatura, los cuales serán utilizados en el capítulo tres para cuantificar a través de indicadores y un índice, el estado actual de la seguridad energética del gas natural.

En el capítulo cuatro se modela a partir de indicadores primarios la estructura y las relaciones existentes en la cadena de suministro del gas natural. Esto con el fin de evaluar en un periodo de 35 años el comportamiento conjunto de las fases de la cadena de suministro, además de identificar los principales desafíos del sector y tener una visión global de la seguridad energética en la cadena de suministro.

Los indicadores utilizados permiten evaluar la evolución de la Seguridad Energética durante el periodo 2010-2016. Además, a través del cálculo de un único índice se logra identificar los periodos de balance y desbalance, teniendo en cuenta las dimensiones que

se definieron para el sistema. En cuanto al modelamiento del conjunto de indicadores, éste permite valorar el futuro de cada una de las etapas, por ejemplo, se obtuvo como resultado que una de las falencias está en la de producción interna, deteriorada principalmente por el bajo éxito en la exploración, la poca inversión y los altos costos de esta actividad.

Finalmente, se concluye que el conjunto de indicadores es apropiado para evaluar y analizar la seguridad energética, resultan de gran utilidad al ser aplicados en un índice como el de desbalance y en un modelo que usa dinámica de sistemas, lo cual permite definir el estado actual y futuro de la seguridad energética en la cadena de suministro del gas natural. A partir de los resultados obtenidos en este trabajo, se logró determinar el progresivo deterioro en la S.E en diferentes periodos debido al desabastecimiento del gas natural, propiciado principalmente por el aumento de la demanda, la baja inversión en el sector, específicamente en exploración y, la dificultad para importar volúmenes adicionales del energético.

1. Objetivos y Metodología

En el primer capítulo se hace una breve reseña de la relevancia de las diferentes fuentes energéticas en el mundo. Además, se generaliza la situación del sector del gas natural en Colombia y en base a esto se desarrolla el enfoque de la tesis de maestría, que incluye los objetivos y la metodología de trabajo, así como la organización de los contenidos del documento.

1.1 Motivación

El gas natural es una de las fuentes de energía de origen fósil que ha cobrado relevancia desde el siglo XVIII, cuando el hombre inició la llamada revolución industrial y desde entonces se ha ido reconociendo su importancia en la canasta de energéticos de diferentes países. Según la International Energy Agency (IEA) para el 2040 serán cuatro las principales fuentes de energía: petróleo, gas natural, carbón y fuentes renovables (IEA, 2015).

Entre el 2005 y 2015 el consumo mundial de energía primaria aumentó en 20.2% (BP, 2016) y se espera que entre 2012 y 2040 la demanda de energía primaria se incremente un 48% (IEA, 2015). Para 2040, se espera que el 21.8% de la demanda de energía primaria sea de combustibles fósiles, 18.8% gas natural y 11.8% fuentes renovables (IEA, 2015).

De acuerdo con Liu (2015) entre 2010 y 2012 se registró un aumento del 2% (222 millones de personas) en el acceso a la electricidad. De igual forma, el indicador de intensidad energética muestra de manera cuantitativa un avance en la disminución de la pobreza energética a nivel mundial, sin embargo, estuvo 2.6% por debajo de la meta.

El acceso a la energía y la intensidad energética se enmarcan en un concepto conocido como: Seguridad Energética. No hay una única definición de seguridad energética, pero entre los más utilizados en la literatura se encuentra el de la IEA que define la seguridad energética como la disponibilidad ininterrumpida de las fuentes de energía a un precio asequible (IEA, 2001, p. 76). Winzer (2011) basado en una revisión de literatura concluye que el concepto es limitado por cada autor de forma implícita o explícita de acuerdo con unas dimensiones asociadas, las cuales tienen que ver con: fuentes de riesgo, el alcance de la medida del impacto, velocidad, tamaño, sustento, propagación, seguridad o confianza en el impacto. El desafío es limitar los indicadores apropiados para su medición e ir más allá de la idea detrás del concepto (Löschel, Moslener, & Rübbelke, 2010).

El World Energy Council (WEC) calcula un índice de seguridad energética que junto con la sostenibilidad medioambiental e igualdad energética se usa para calificar la sostenibilidad energética de 129 países (WEC, 2016). En 2016, Colombia subió seis puestos respecto al 2014 y alcanzó el puesto 41 de sostenibilidad. La mayor parte de este aumento de calificación de sostenibilidad se debe a la mejora en seguridad energética que pasó de 46 a 36 (un menor valor indica mayor seguridad).

A pesar que en el estudio presentado por Wang & Zhou (2017) Colombia recibe la calificación de “Buen rendimiento de seguridad energética”, existen condiciones que pueden llevar a una interrupción del suministro.

La composición de las fuentes primarias de energía en Colombia incluye: Carbón, petróleo, gas natural, hidro y otras fuentes renovables. La disponibilidad y diversidad en recursos energéticos es la causa principal que en Colombia existan excedentes de producción energética. Los reportes de BP (2016) indican que la producción nacional diaria de crudo es de 1008 KBPD cuyo consumo interno es del 32.8%. Mientras que el consumo de gas natural es del 95.4% de los 2400 Mpcd.

Bajo un escenario mundial de crisis petrolera, en Colombia la percepción del aumento de riesgo de inversión se ha asociado a la caída en el precio del petróleo y a la alta dependencia del Gobierno a los ingresos del petróleo (UPME, 2015d). En la industria petrolera el efecto de la caída de precios se ha visto, por ejemplo, en las estrategias de

negocio que han tenido que implementar compañías como Ecopetrol, la cual ha tenido que tomar medidas de disminución de costos y aumento de eficiencia en sus operaciones (Ecopetrol, 2015).

Colombia sufrió durante 2015 y 2016 uno de los períodos de mayor sequía (fenómeno del Niño) de los últimos 20 años (IDEAM, 2016). Aunque se continuó con la exportación de electricidad, se generó gran tensión por la salida de funcionamiento de la planta hidroeléctrica Guatapé. Por daños en el sistema se dejó de generar el 15% de la producción total nacional (Presidencia de la República, 2016). Durante el periodo de sequía se tomaron las siguientes medidas: uso de termoeléctricas (generación histórica), importación de energía desde Ecuador (7 GWh de electricidad diarios) e incentivos a la autogeneración y cogeneración. Adicionalmente, como medida de apoyo se otorgaron incentivos económicos a los usuarios por el ahorro de energía (CREG, 2016).

La UPME determinó que Colombia contará con abastecimiento de gas natural hasta febrero del 2024; se llegó a esta conclusión luego de hacer un balance de la demanda media cuya proyección va en aumento, en contravía de la oferta que tiene tendencia a la baja. Este escenario puede presentarse porque las políticas internas incentivan el uso del gas natural y se cuenta con infraestructura instalada para el uso del mismo. Sin embargo, del lado del suministro falta inversión en exploración de nuevos campos que permitan cambiar el panorama de desabastecimiento (UPME, 2015a).

Una de las medidas recientes para ampliar los volúmenes de gas natural disponibles en el mercado colombiano, es la contratación de terminales de regasificación y almacenamiento de gas natural licuado (G.N.L), con el objetivo de proveer del combustible prioritariamente a las centrales térmicas. La capacidad de la central ubicada en Cartagena es de 400 Mpcd (MinMinas, 2016), lo que equivale aproximadamente al 16.7% del consumo interno de gas natural. Adicionalmente, el Gobierno Nacional ha resuelto construir una segunda planta de regasificación en el Pacífico con una capacidad de 220 Mpcd, la cual entraría en operación en el 2023 (Promigas, 2017). Además se contemplan inversiones en diferentes facilidades del sistema en algunas zonas del país (MinMinas, 2017).

La figura de comprador de G.N.L por la que está apostando el país puede disminuir la incertidumbre respecto a la obtención del energético ante la tendencia de reducción de

inventarios del energético. Existe una alerta respecto al comportamiento del mercado del energético, el cual cuenta con una gran cantidad de volúmenes de gas de esquisto producido por Estados Unidos, lo cual ha generado una disminución general de los precios del energético y de no seguir las proyecciones más optimistas va a conllevar a una significativa falta de capacidad para satisfacer la demanda mundial. Además, se ha ralentizado el desarrollo del comercio spot, el surgimiento de un mercado global de gas natural y un desestimulo al desarrollo de energías alternativas renovables (Cherp et al., 2012, p. 19). Por lo cual, puede ser conveniente valorar los adelantos con los que cuenta el sector a nivel interno: conocimiento de las cuencas geológicas, experiencia y optimización de los procesos y los equipos e infraestructura instalada.

En el año 2007 las compañías Ecopetrol, Chevron y Petróleos de Venezuela S.A (PDVSA) suscribieron un contrato de compra y venta de gas natural entre Colombia y Venezuela, el cual estuvo en vigencia desde el 2008 y concluyó en junio de 2015. Durante este período el envío del combustible a través del gasoducto Antonio Ricaurte (capacidad de transporte máxima de 480 Mpcd) sólo se hizo desde Colombia exportando en promedio 134 Mpcd (Promigas, 2016). Se espera que en el 2018 se realice la entrega de 39 Mpcd de gas natural (3% oferta diaria) desde Venezuela. El acuerdo recíproco ha sido incumplido, debido a que la petrolera estatal PDVSA ha dado prioridad a la demanda interna (MinMinas & Ecopetrol, 2016).

1.2 Preguntas de discusión

De acuerdo con las métricas recolectadas para Colombia, se podría resumir que algunos datos obtenidos muestran un escenario de posible escasez del gas natural y las medidas tomadas para enfrentar esta situación son sólo recientes y no hay un análisis que muestre si serán suficientes y convenientes. Además, la percepción externa muestra que hay avances en el desempeño del país, aunque no es claro si se identifican falencias en la cadena de suministro de las fuentes de energía, específicamente la del gas natural.

Entre las preguntas que surgen de la discusión anterior están:

- ¿Pueden prevenirse situaciones indeseadas luego de conocerse el nivel de seguridad energética? ¿Cómo identificarlas?

- ¿Representa alguna diferencia en el cálculo de la seguridad energética si se destacan algunas dimensiones sobre otras?
- ¿Cuáles deberían ser los indicadores mínimos de seguridad energética?
- ¿Qué indicadores son adecuados para identificar la seguridad del suministro de un energético en un país que es autosuficiente?
- ¿Cómo se define qué indicadores deben ser considerados y cuáles deben descartarse?
- ¿Es necesario agrupar los indicadores por dimensiones de seguridad energética?
- ¿En qué escala deben calcularse los indicadores?
- ¿Debe determinarse un rango para determinar el nivel de seguridad energética?
- ¿Cómo se construye un índice relacionado a la seguridad energética?

1.3 Definición problema de investigación

Dentro de las limitaciones que se identifican en el sector energético no solo está en la diversidad de definiciones en torno a la seguridad energética y las dimensiones asociadas, sino también la diversidad de los indicadores que deben conformar un índice de seguridad energética. Un índice de seguridad energética que sea novedoso y aplicable en una etapa de cambio de fuentes de energía resulta conveniente para quienes toman las decisiones de planeamiento energético (García-Gusano, Iribarren, & Garraín, 2017).

Para Colombia la definición de un índice de seguridad energética debe tener en cuenta la auto sostenibilidad energética, debido a que es uno de los aspectos no sólo característicos del sistema energético colombiano sino porque debido a los recientes acontecimientos resulta ser altamente vulnerable ante eventos críticos. En cuanto al gas natural se ha reconocido que una de las falencias del sistema está principalmente en que la producción nacional ha intentado ser aliviada por las importaciones, pero no hay un diagnóstico que permita determinar el estado de las etapas restantes de la cadena del suministro y poder tomar medidas para mitigar posibles debilidades o mantener un estado óptimo de ésta.

En este trabajo de investigación se evaluará la seguridad energética en toda la cadena de suministro del gas natural planteada a partir de indicadores relacionados, los cuales permitirán tener una perspectiva de la cadena de gas natural en el largo plazo.

1.4 Hipótesis de investigación

La hipótesis de investigación para este trabajo de maestría consta del análisis de la cadena del suministro del gas natural en Colombia, a partir de un conjunto de indicadores propuestos, los cuales serán aplicados en un índice que permita determinar el desbalance de la cadena y también serán aplicados en un modelo de dinámica de sistemas. Al final, se determinará el estado de la seguridad energética del gas natural en el país.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Analizar la seguridad energética en el largo plazo para el gas natural en Colombia teniendo en cuenta la cadena de suministro.

1.5.2 Objetivos específicos

- Identificar los diferentes enfoques reportados en la literatura para medir o evaluar la seguridad energética.
- Identificar los indicadores necesarios para evaluar la seguridad energética en la cadena de suministro de gas natural en Colombia.
- Revisar los índices y modelos que han sido utilizados para analizar la seguridad energética en la literatura e identificar los aplicables al caso de la cadena de gas natural en Colombia.
- Proponer y ajustar un modelo para evaluar la seguridad energética actual y de largo plazo en Colombia, considerando la cadena de gas natural.
- Analizar los resultados.

1.6 Alcance y aportes

El trabajo pretende el cálculo de un único índice que compromete la identificación y cálculo de indicadores, los cuales podrán ser verificados de acuerdo con la información obtenida de las fuentes de información consultadas. Además, el modelo planteado para proyectar la seguridad energética tendrá coherencia con la información tratada en el mismo trabajo.

Al dar cumplimiento a los objetivos específicos propuestos se logra definir un mínimo de indicadores de gas natural los cuales resultan útiles para calcular el índice de desbalance, con él se identifica el panorama actual de la cadena de suministro. Además de plantear un modelo que permite calcular la seguridad energética, el cual puede ser utilizado para la toma de decisiones por parte de los agentes involucrados en procesos asociados.

El trabajo no pretende dar solución a problemas relacionados con el sector energético, primordialmente al gas natural, como lo es el desabastecimiento y desarrollo sostenible, sino más bien, como se mencionó previamente, a través del uso de indicadores primarios se podrá evaluar tanto el estado reciente y futuro de la cadena de suministro. Esto mediante el cálculo de un único índice y mediante las proyecciones de los indicadores obtenidas a partir de un modelo de dinámica de sistemas, el cual tiene entre algunas aplicaciones, conocer el alcance de una determinada decisión en un periodo de tiempo.

1.7 Metodología de trabajo

La metodología que se implementó para relacionar los objetivos específicos con las actividades se desarrolla en la Tabla 1-1.

Tabla 1-1: Metodología de trabajo

Fase	Objetivo	Actividades
Fase 1: Conformación del marco teórico y revisión del estado del arte.	Identificar los diferentes enfoques reportados en la literatura para medir o evaluar la seguridad energética.	<p>Determinar si el concepto de seguridad energética es adecuado y de interés a través de la cantidad de estudios relacionados al tema.</p> <p>Revisión de literatura académica en bases de datos.</p> <p>Organización de la información encontrada de acuerdo con:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Dimensiones ▪ Palabras clave ▪ Área de aplicación
Fase II: Identificar y delimitar los indicadores de seguridad energética aplicables al caso colombiano.	Identificar los indicadores necesarios para evaluar la seguridad energética en la cadena de suministro	<p>Revisión bibliográfica sobre indicadores de seguridad energética.</p> <p>Distinguir para los trabajos más citados:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Indicadores. ▪ Dimensiones.

Tabla 1-1: Metodología de trabajo

Fase	Objetivo	Actividades
	de gas natural en Colombia.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Escala temporal. ▪ Índice que calculan. <p>Se determina a partir de la definición de cada indicador la pertinencia y aplicabilidad al caso colombiano.</p> <p>Identificación de los datos para el cálculo de los indicadores y consulta de información histórica en:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Entidades nacionales gubernamentales: Ej: MinMinas. ▪ Entidades mundiales autónomas: Ej: IEA. ▪ Entidades de planeación energética: Ej: UPME. ▪ Entidades de análisis económico y financiero: Ej: Banco Mundial.
	Revisar los índices y modelos que han sido utilizados para analizar la seguridad energética en la literatura e identificar los aplicables al caso de la cadena de gas natural en Colombia.	<p>Revisión de literatura en bases de datos académicas sobre casos de índices y modelos de seguridad energética aplicados en el mundo.</p> <p>Reporte de los principales índices utilizados para evaluar la seguridad energética. Evaluar la pertinencia de cada uno y su aplicabilidad en la presente investigación.</p> <p>Selección de modelos relevantes los cuales hayan sido aplicados para estimar la seguridad energética. Selección de una técnica de modelamiento apropiada para el caso de estudio.</p> <p>Identificación de los datos necesarios para el cálculo del índice seleccionado, como en el modelo a construir.</p>
Fase III: Diseño y construcción del modelo de seguridad energética.	Proponer y ajustar un modelo para evaluar la seguridad energética actual y de largo plazo en Colombia,	Modelamiento de la cadena de suministro de acuerdo con la técnica seleccionada para evaluar la seguridad energética.

Tabla 1-1: Metodología de trabajo

Fase	Objetivo	Actividades
	considerando la cadena de gas natural.	Indicar la pertinencia del modelo propuesto. Uso de datos para realizar los cálculos de las variables necesarias.
Fase IV: Implementación de la metodología y análisis de resultados.	Analizar los resultados.	Determinar valores típicos y atípicos de los indicadores de seguridad energética. Analizar la tendencia del índice de seguridad energética para cada periodo calculado. Determinar el grado de seguridad energética del gas natural colombiano de acuerdo con los valores obtenidos en el índice calculado. Analizar el estado de la seguridad energética de acuerdo a los resultados obtenidos para la cadena de suministro del gas natural en Colombia.

1.8 Organización del documento

Con el fin de alcanzar los objetivos propuestos, el documento ha sido planteado en el siguiente orden: En el capítulo 2 se definen los principales conceptos en torno a la seguridad energética y el estado del arte. En el capítulo 3 se encuentra detallada la metodología para determinar el estado de la seguridad energética en el caso de estudio, esto a partir del cálculo de indicadores y un único índice. En el capítulo 4 se aplica la técnica de modelamiento de dinámica de sistemas para ajustar un modelo de seguridad energética para la cadena de suministro del gas natural en Colombia. Finalmente, en el capítulo 5 se presentan las conclusiones y recomendaciones del trabajo.

2. Conceptos de seguridad energética

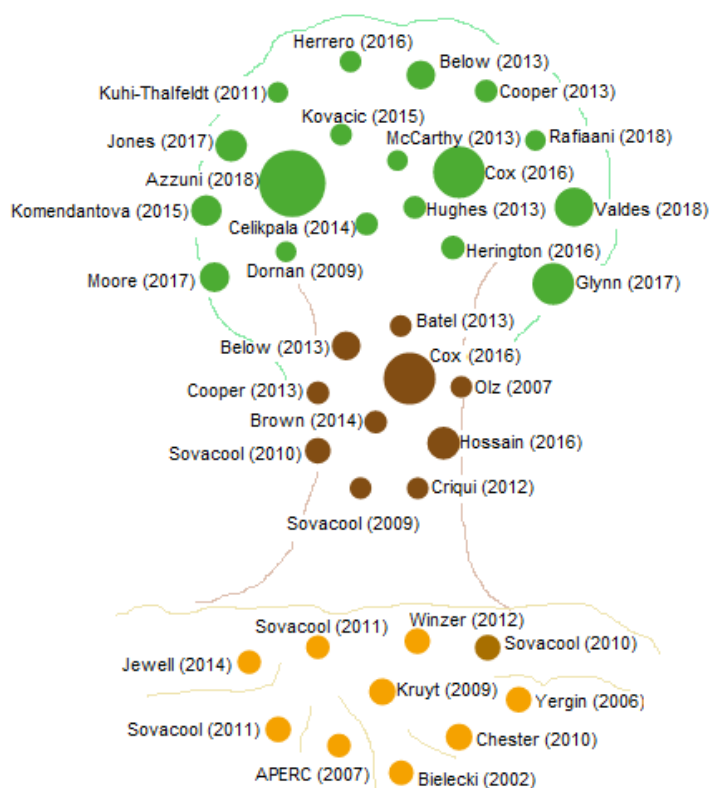
En este capítulo se presentan las diferentes definiciones y enfoques de la seguridad energética (S.E) encontradas en la literatura. Se determina que la S.E debe ser definida y evaluada a partir de unas métricas (indicadores e índices) que permitan orientar el concepto. Al final del capítulo se presentan diferentes modelos encontrados en la literatura, los cuales se han usado para evaluar la S.E en diferentes países y regiones.

2.1 Definición de seguridad energética

Al realizar la búsqueda de *“Energy Security” Definition*, en la base de datos: Web of Science (Core Collection), se registraron desde el año 2006 alrededor de 58 fuentes de información. Al aplicarlos en la herramienta Tree of Science (ToS)¹, se obtienen los resultados mostrados en la Figura 2-1, los cuales están agrupados de acuerdo con la estructura de un árbol: en las raíces (círculos amarillos) se encuentran los autores cuyos trabajos han servido como base para la construcción del concepto y el desarrollo de otras investigaciones. Siguiendo la misma lógica, se encuentran en el tronco (círculos cafés), los autores cuyos estudios se han fundamentado en los anteriores, pero presentan nuevos aspectos que le dan estructura; y finalmente en el follaje (círculos verdes) se identifican los autores que tienen trabajos más recientes y que reconocen la universalidad del concepto. Aunque la búsqueda determinó la existencia de 58 autores relacionados con el criterio de búsqueda, el ToS selecciona sólo aquellos con las fuentes más citadas (raíz y tronco) y recientes (follaje), por lo que al final sólo se encuentran en el grafo 38 registros. Además, sólo se menciona el autor que tiene más relación con el tema. En el Anexo A, se encuentra el listado completo de las fuentes de información utilizadas para la elaboración del gráfico.

¹ ToS es una herramienta utilizada para organizar la literatura científica obtenida a partir de bases de datos. <http://tos.manizales.unal.edu.co/home>

Figura 2-1: Resultados obtenidos en Web of Science de documentos relacionados a "Energy Security" Definition.



Fuente: Elaboración propia utilizando la herramienta Tree of Science.

Entre las ideas en las que se basan los trabajos en S.E (círculos amarillos) se destaca que el foco de la seguridad energética está dado por los traumas que se pueden generar, especialmente a nivel económico y político (Yergin, 1988). Para Bielecki (2002, p. 3) "la seguridad energética es el suministro confiable y adecuado a precios razonables"; donde los llamados "precios razonables" están en función del tiempo y son percibidos de acuerdo a si el rol es de productor o consumidor, por lo que sugiere determinar los precios a partir del balance entre la oferta y la demanda. Finalmente, Kruyt, Vuuren, Vries, & Groenenberg (2009) centran el interés en la noción de que el suministro ininterrumpido de energía es fundamental para el funcionamiento de una economía.

Los estudios ubicados en el tronco (círculos cafés), van más allá de encontrar una única definición, tal como lo menciona Cox (2016): es posible que los expertos tengan una concepción de la S.E de acuerdo al tipo de organización a la cual están vinculados y al

área sobre la cual ésta actúa, por lo cual el concepto puede por ejemplo encaminarse en dos sentidos, el primero está ligado a los riesgos del sistema y a la implementación de políticas que lleven a un tipo de actuación ante la materialización de estos; y el otro camino que se puede tomar es confiar en la información que se pueda obtener de las mediciones, lo cual es más simple y directo. Sovacool & Brown (2010) reconocen la necesidad de definir la S.E en diferentes dimensiones, pero es más conveniente que éstas sean integradas y evaluadas holísticamente, porque cuando se orientan las acciones en pro de mejorar un sólo aspecto de la S.E, se obtienen resultados indeseados a expensas de desatender las otras dimensiones, uno de los ejemplos planteados es la reducción de la dependencia del petróleo del sector transporte a través del uso de biocombustibles, el cual requiere un gasto ambiental a partir del uso generalizado de fertilizantes y el deterioro de la biodiversidad de los ecosistemas por la implementación de monocultivos

Below (2013) hace la observación de la S.E desde la política en los Estados Unidos, la cual se ha enfocado tanto en el discurso presidencial como en las decisiones del congreso por la construcción de infraestructura, con la cual se asegura el suministro interno de energéticos. Además, se asocia la S.E con la seguridad nacional, en términos de la dependencia de importación de petróleo.

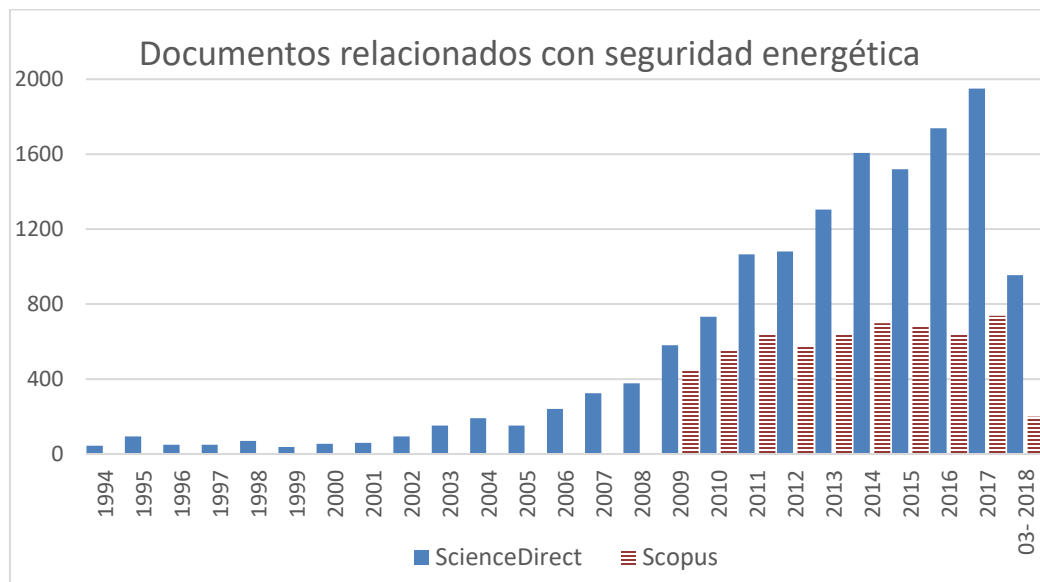
En el debate académico por ofrecer una única definición para la S.E, se encuentran opiniones más recientes como la de Azzuni & Breyer (2018): “Es aquel aspecto (medida, situación o estado) en el cual un sistema funciona de manera óptima y sostenible en todas sus dimensiones, libre de cualquier amenaza”. La generalidad de esta definición permite incluir todo tipo y cantidad de dimensiones, además se agrega la representación de todos los riesgos presentes en el sistema. Glynn, Chiodi, & Ó Gallachóir (2017) no presentan formalmente una definición actualizada del concepto, sin embargo, indican que las definiciones siguen teniendo ejes en común: ausencia, protección o adaptabilidad a amenazas, las cuales son generadas en la cadena del suministro o tienen impacto en ella.

En definitiva, la S.E es un término muy amplio, sobre el cual, existen acuerdos de lo que debe cubrir, más no existe un consenso para una única definición (Chester, 2010).

La S.E es un campo que emergió a finales de los 70's y dado el permanente interés en los últimos años, se recomienda hacer una revisión periódica de la definición para asegurar

que el término siga siendo relevante (Ang, Choong, & Ng, 2015). Para verificar que en la actualidad el concepto sigue siendo pertinente, se realizó la búsqueda en bases de datos científicas, puntualmente en ScienceDirect y Scopus del término: “Energy Security”, con lo cual se verificó el creciente interés por parte de la comunidad académica hacia el concepto (Figura 2-2).

Figura 2-2: Búsqueda de documentos relacionados a “Energy Security” en bases de datos.



Fuente: Elaboración propia de acuerdo con datos obtenidos en ScienceDirect y Scopus.

A continuación, se hace la revisión de la literatura con el fin de identificar los diferentes enfoques del concepto de SE y seleccionar aquel que resulte adecuado para el problema de interés en esta tesis.

2.2 Dimensiones de seguridad energética

Tal vez en la historia de la humanidad pudieron ser varios los acontecimientos que gestaron la concepción de la seguridad energética, pero tal como lo menciona Yergin (1988), ninguno había logrado catapultar el concepto a la cima de la agenda internacional como lo hizo el embargo petrolero ocurrido en Octubre de 1973; donde las áreas

directamente relacionadas con la seguridad energética fueron: la economía, la sociedad y la política.

Si bien durante la crisis de los 70's, el suministro del petróleo fue el tema principal abordado por la seguridad energética, desde entonces, el concepto ha tenido una continua evolución a la par de los sistemas energéticos que le permitieron adquirir un carácter multidimensional (Cherp & Jewell, 2011). Los ejemplos presentados a continuación, dan cuenta que la geopolítica, la sostenibilidad, la aceptabilidad y el riesgo son sólo algunas de las perspectivas utilizadas para explicar la S.E:

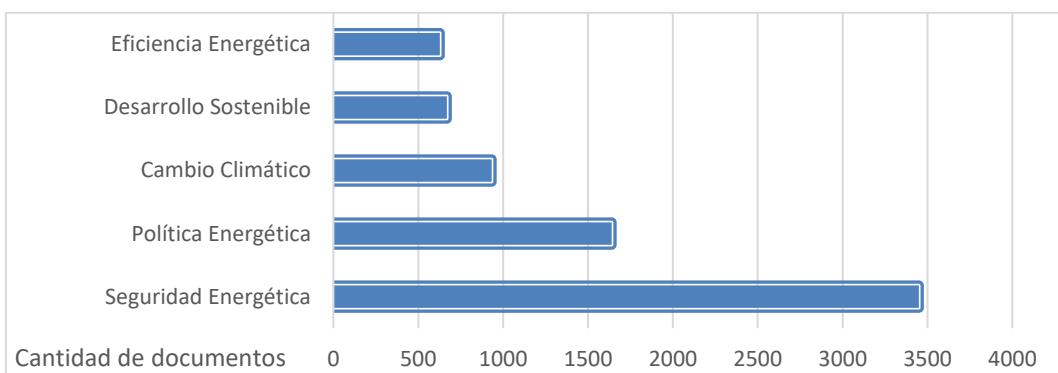
- El conflicto entre naciones por la adquisición de recursos energéticos, como el que se dio a inicios de los 90's, tras la invasión de Irak a Kuwait para mejorar el control sobre las reservas del petróleo y así reducir la dependencia de recursos extranjeros (Sovacool & Brown, 2010, p. 81).
- Otro caso recurrente ha sido el desabastecimiento de gas natural que ha sufrido la Unión Europea (tres veces desde 2006) a causa del conflicto entre Rusia y Ucrania, principalmente por la negociación de tarifas de venta del gas de origen ruso y el uso de suelo ucraniano para transportar el energético desde Rusia hacia la Unión Europea (López, 2016).
- La industria petrolera que a pesar de la destreza tecnológica se ha vuelto impopular por la relación directa que tienen los combustibles fósiles con la degradación del medio ambiente (Yergin, 1991).
- La Unión Soviética tenía una economía fuerte en 1960, pero hubo un aumento en la extracción y exportación de gas natural y petróleo, los cuales participaban en mercados impredecibles y sobre los cuales la Unión Soviética no tenía influencia significativa. Fue así como para finales de los 80's esa dependencia terminó siendo una de las causas de la disolución del sistema socialista más grande del mundo (Ermolaev, 2017).
- Los cambios periódicos que se dan en los Estados Unidos, especialmente en el congreso y en la presidencia, han permitido identificar que cada una de las administraciones desde 1999 hasta 2010, han mantenido un discurso de la S.E que converge en la confiabilidad en la infraestructura, con lo cual han logrado gerenciar los recursos propios y se intenta mantener un perfil de autosuficiencia energética (Below, 2013).
- Las estrategias militares han tenido que ampliar los frentes de defensa, debido a que la era digital ha puesto como escenario adicional al ciberespacio con lo cual han

aumentado las amenazas a la seguridad internacional. Tan sólo en el mes de mayo de 2009, Kaspersky Anti-Virus Lab detectó 42250 programas sospechosos en los computadores de sus clientes algunos de ellos dirigidos específicamente a sistemas energéticos (Geers, 2010).

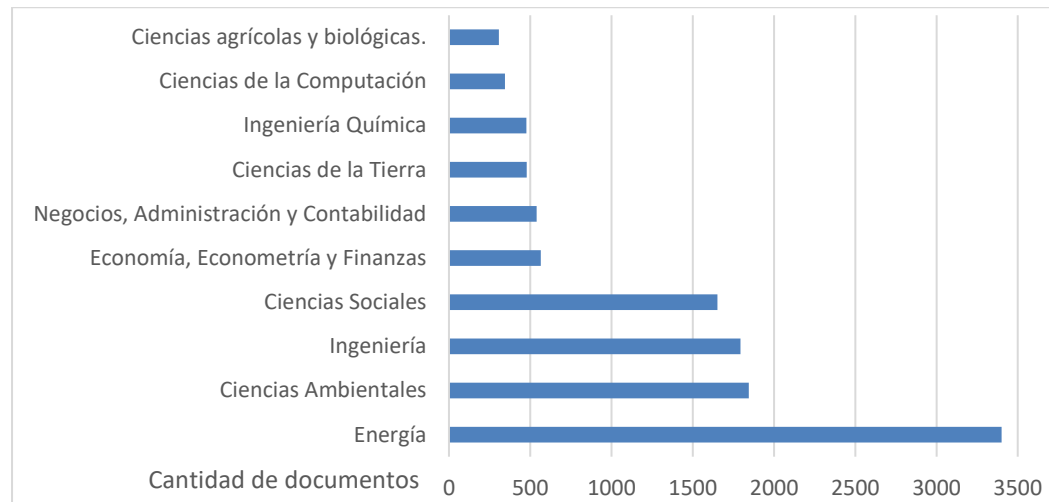
A partir de los anteriores hechos históricos se pueden identificar que las áreas que influyen la S.E son: seguridad del suministro, dependencia, geopolítica, diversificación, estabilidad de precios, sostenibilidad, acceso, equidad, seguridad, desarrollo tecnológico, cambio climático, ciberataques, seguridad nacional, contaminación, riesgo y aceptabilidad.

Todo lo anterior da indicio de que la seguridad energética no se trata de un concepto aislado, por el contrario, tal como se muestra en la Figura 2-3 y Figura 2-4, en la literatura científica se tratan en conjunto los conceptos de eficiencia energética, desarrollo sostenible, cambio climático, política energética y seguridad energética (Figura 2-3). Además, entre las principales áreas en las cuales se considera a la S.E están: energía, ciencias ambientales, ingeniería y ciencias sociales (Figura 2-4). Las gráficas se realizaron a partir de los registros obtenidos de la búsqueda de “Energy Security” en la base de datos Scopus.

Figura 2-3: Resumen de las principales palabras claves en documentos científicos relacionados con la seguridad energética.



Fuente: Elaboración propia de acuerdo con datos obtenidos en Scopus.

Figura 2-4: Áreas del conocimiento de los estudios que tratan la seguridad energética.

Fuente: Elaboración propia de acuerdo con datos obtenidos en Scopus.

El carácter multidisciplinar se registra en la literatura desde el 2007 con el informe presentado por Asia Pacific Energy Research Centre (APEREC), en el cual se relaciona la seguridad energética en Asia con cuatro dimensiones: Disponibilidad, Asequibilidad, Accesibilidad y Aceptabilidad (conocidas como las 4 A's por sus siglas en inglés: Availability, Affordability, Acceptability and Accessibility). Las cuales tienen en cuenta las fuentes de energía y las posibles barreras para su obtención, así como también los impactos ambientales que el uso de éstas pueda producir y los costos asociados a la cadena productiva. El análisis de estas dimensiones permite implementar medidas a largo plazo para hacer frente a las tendencias de la oferta y la demanda. (Asia Pacific Energy Research Centre, 2007)

Para otros autores el foco de atención se ha centrado en las vulnerabilidades que se presentan en el sistema en el corto plazo, así para Cherp & Jewell (2011) el discurso de la S.E se ha separado en tres perspectivas: Resiliencia, Robustez y Soberanía. La *resiliencia* se entiende como la capacidad de soportar diversas interrupciones y preparación de los sistemas energéticos ante la materialización de riesgos; la *robustez* es definida como suficiencia de recursos, confiabilidad de infraestructura, precios estables y asequibles y, la *soberanía*, desde la que se usan estrategias para evitar que los sistemas críticos sean amenazados por agentes externos.

De lo anterior se puede deducir que las dimensiones de S.E no sólo se usan para denotar áreas de interés en determinado lugar, sino que también se categorizan de acuerdo con la influencia que ejercen en las diferentes escalas de tiempo. Por ejemplo, en el corto plazo, las principales ocupaciones son las perturbaciones del suministro físico y la inestabilidad en precios; mientras que en el largo plazo, la preocupación está en disponer de energía suficiente para alcanzar un desarrollo económico estable y sostenible (Costantini, Gracceva, Markandya, & Vicini, 2007).

La definición de S.E usada por la IEA se enmarca en las dimensiones de disponibilidad y aceptabilidad (IEA, 2001). Por otra parte, la asequibilidad y la aceptabilidad fueron incorporadas por el World Energy Council para adicionar los aspectos sociales, ambientales y económicos en la S.E (WEC, 2014). La S.E se puede fijar de acuerdo a los parámetros a incluir o las áreas a evaluar, así por ejemplo, Larsen, Osorio, & Van Ackere, (2016) definieron un marco de evaluación de la seguridad del suministro eléctrico, en el cual usan doce dimensiones relevantes para el sector eléctrico, entre las cuales se encuentran: adecuada generación, resiliencia, confiabilidad, suministro flexible, administración de la demanda, eficiencia en las regulaciones, entre otras. Los autores aclaran que ninguna dimensión sobresale entre las otras, dejando este aspecto al criterio de los interesados.

En general, las perspectivas sirven para enmarcar la seguridad energética de acuerdo con la aplicabilidad del concepto e interés de evaluación.

2.3 Medición de la seguridad energética

Existen en la literatura diferentes metodologías que permiten evaluar la seguridad energética, tanto cuantitativa como cualitativamente. En general, se ha encontrado que los indicadores son una herramienta comúnmente utilizada para cumplir tal objetivo, además, cuando se toman en conjunto, estos pueden conformar un índice, el cual es una forma resumida de explicar un grupo de indicadores.

2.3.1 Indicadores

Un indicador es un elemento representativo en el cual se supone hay confianza porque representa el comportamiento del conjunto del cual fue extraído. Los indicadores corresponden teóricamente con las variables a medir (Guitton, 1960).

Cherp & Jewell (2010) determinaron que la formulación del concepto de seguridad energética es el primer paso para su análisis y debe completarse mediante la identificación de indicadores, los cuales deben estar claramente definidos y tener fundamento teórico. Krut et al. (2009) recomiendan ser cuidadosos con el papel de los indicadores usados en la seguridad energética porque son muy amplios y son de naturaleza subjetiva; para ayudar a capturar algún tipo de objetividad, los autores proponen indicadores que sean medidos cuantitativamente y que puedan ser usados para la proposición de políticas.

Löschel et al. (2010) plantean dos tipos de indicadores: los primeros son ex post que intentan responder a la pregunta: ¿El sistema energético, causó fricciones a la economía en el pasado?; y los indicadores ex ante plantean: ¿Se puede esperar que se produzcan grandes fricciones en el sistema energético en el futuro? La International Atomic Energy Agency (IAEA) expresa que, tomados en conjunto, los indicadores ofrecen un panorama sin trabas de todo el sistema incluidas las interconexiones y compensaciones, así como las implicaciones a más largo plazo de las actuales decisiones y comportamientos. Además, aunque tenga un mismo valor, el significado de cada indicador puede resaltar aspectos diferentes de cada país, por lo que hay que evaluar cada caso en particular (IAEA, 2008). Por ejemplo, podría presentarse una disparidad entre las fuentes energéticas: en el caso del gas natural se podrían alcanzar picos en la producción años más temprano que en el caso del petróleo; pero con este último, los riesgos de aumentos de precios son más alarmantes. Este comportamiento afecta los precios de los energéticos en el mercado mundial y, en consecuencia, deteriora la economía de la seguridad energética (Cherp et al., 2012).

En la Tabla 2-1 se presentan documentos en orden de citación que contienen los indicadores utilizados para evaluar la S.E, los estudios tienen en común que abordan la S.E de todo un sistema y no para una fuente energética específica. En la tabla se vincula

la línea de tiempo del concepto y el objetivo determinado a partir de las dimensiones, así como la aplicabilidad de los indicadores en diferentes índices.

Tabla 2-1: Indicadores de S.E obtenidos de la literatura.

Referencia	Indicadores definidos	Dimensión/ Área	Escala temporal		Índice en el que se usan
			Corto Plazo	Largo Plazo	
(Kruyt, van Vuuren, de Vries, & Groenenberg, 2009) Citas: 557	6	Asequibilidad		X	<ul style="list-style-type: none"> Trilema Energético. RESI (Renewable Energy Security Index). NCI (Nelson Complexity Index)
	5	Disponibilidad		X	
	3	Aceptabilidad		X	
	5	Accesibilidad		X	
	1	Asequibilidad y Disponibilidad		X	
	1	Accesibilidad y Asequibilidad		X	
	Total: 21				
(Costantini, Gracceva, Markandya, & Vicini, 2007) Citas: 202	4	Dependencia	X		<ul style="list-style-type: none"> Trilema Energético. EAPI (Energy Architecture Performance Index). RESI. NCI
	2	Vulnerabilidad demanda	X		
	Total: 6				
(Birol, 2007) Citas: 149	1	Asequibilidad	X		EAPI
	Total: 1				
IAEA (2008) Citas: 147	47	Economía	X	X	<ul style="list-style-type: none"> Trilema Energético EAPI RESI NCI
	13	Ambiental	X	X	
	12	Social	X	X	
	Total: 72				
(Kim, Shin, & Chung, 2011) Citas: 64	2	Asequibilidad	X		Trilema Energético
	2	Eficiencia	X		
	1	Demografía	X		
	Total: 5				
(Chuang & Ma, 2013) Citas: 34	2	Vulnerabilidad	X		RESI, EAPI
	1	Dependencia	X		
	1	Aceptabilidad	X		
	2	Asequibilidad	X		
	Total: 6				
(Kisel, Hamburg, Härm, Leppiman, & Ots, 2016) Citas: 11	4	Resiliencia Operacional		X	RESI, NCI
	3	Vulnerabilidad Técnica		X	
	2	Resiliencia Técnica		X	
	Total: 9				

En uno de los estudios de la Tabla 2-1, se utiliza el indicador porcentaje de personas que usan formas modernas de energía, el cual planteado como objetivo implicaría un aumento en la tasa de electrificación y el uso de combustibles modernos, lo cual se resume en mejoría en la asequibilidad (Birol, 2007). Otros estudios consideran que la vulnerabilidad y la dependencia de suministro externo son dimensiones estrechamente relacionadas por lo que le dan prioridad a cuantificar las importaciones de las fuentes primarias de energía (Chuang & Ma, 2013; Costantini et al., 2007). Los factores ambientales también son relevantes y están fuertemente ligados a los aspectos sociales debido a que las buenas prácticas operacionales se han vuelto un foco de atención del público en general (IAEA, 2008; Kim et al., 2011). Para (Kisel, Hamburg, Härm, Leppiman, & Ots, 2016) los indicadores no se deben centrar en un solo tipo de fuente energética, sino en la planificación e identificación de las debilidades del sistema. Finalmente, aparecen indicadores de gobernabilidad (calidad regulatoria, estabilidad política y ausencia de violencia), los cuales se consideran clave en la accesibilidad al sistema energético de un país o región (Kruyt et al., 2009). El listado completo de los indicadores se encuentra en el Anexo B.

Los indicadores de seguridad energética al ser utilizados de forma disciplinada puedan ayudar a definir la ruta adecuada para estructurar estrategias y hacer los objetivos de S.E alcanzables.

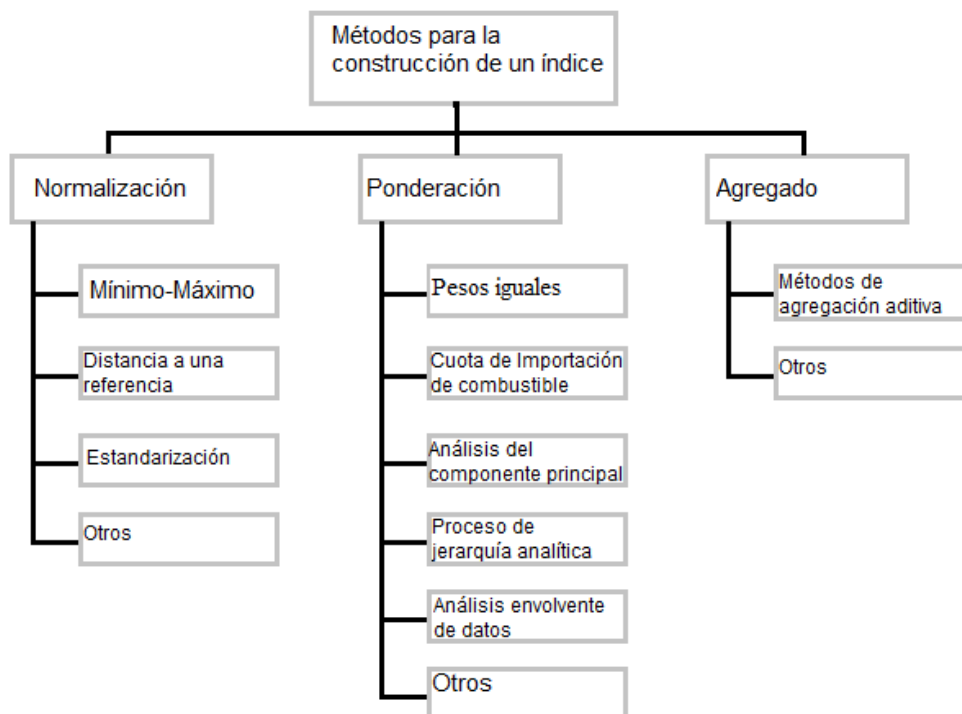
2.3.2 Índices

Un índice se define como una cifra relativa que recoge en un único valor los cambios de una variable o un conjunto de ellas en el tiempo y/o espacio (Alonso-Cifuentes, 2004). Si bien el objetivo tanto de los índices como de los indicadores es la representación numérica de un parámetro, en este documento se hará la distinción entre ambos: los índices se construyen a partir de un conjunto de indicadores. Así los indicadores resumidos en la sección anterior (Tabla 2-1) pueden utilizarse para elaborar un índice de S.E. Según (Ang et al., 2015) un índice de S.E puede ser calculado de acuerdo con la siguiente secuencia de pasos:

- Enmarcar la S.E de acuerdo con las áreas de enfoque específicas o dimensiones.
- Seleccionar indicadores apropiados.
- Recolección de datos.

- Definir un método de construcción del índice, los cuales se resumen en la Figura 2-5.

Figura 2-5: Métodos de construcción de un índice de S.E:



Fuente: Traducido de Ang, Choong, & Ng (2015, p. 1088).

En la Tabla 2-2 se encuentra el listado de los índices de S.E encontrados en la literatura y se indica para cada uno la fórmula o método de cálculo utilizado. La importancia de estos índices es que se han utilizado para hacer un ranking del estado de S.E de un grupo de países o de un país en particular y así definir las metas de S.E particulares o conjuntas.

Aunque los índices se han utilizado para hacer la clasificación de los países de acuerdo al grado de S.E obtenido, la principal aplicabilidad de un índice de este tipo es la identificación de las vulnerabilidades de los sistemas a través del análisis cuidadoso de los valores o calificaciones obtenidas para posteriormente enfocar acciones de continuidad o de cambio para favorecer el estado de la S.E.

Tabla 2-2: Índices utilizados para cuantificar la S.E

Índice (Fuente)	Descripción	Usos propuestos	Fórmula/ método de cálculo del índice	Caso Aplicación
Trilema Energético (WEC, 2017)	Conformado por tres dimensiones: Seguridad energética, Equidad energética (E.E) y Sostenibilidad energética (SOS.E). Además se tiene en cuenta el contexto del país (C.P). A menor índice, mayor es el rango alcanzado por el país.	Evaluar el rendimiento energético de los países en todo el mundo y proporcionar un marco para monitorear el progreso.	$0.3 * E.E + 0.3 * S.E + 0.3 * SOS.E + 0.1 * C.P$	125 países de forma individual-Ranking Mundial
Rendimiento Global de la Arquitectura Energética (EAPI) (World Energy Forum, 2017)	Calculado a partir de tres objetivos: Crecimiento económico y desarrollo (CED), sostenibilidad ambiental y acceso (SAA), y seguridad energética (S.E). Cada uno de estos subíndices tiene igual prioridad sobre el índice, pero cada subíndice es calculado a partir de un conjunto específico de indicadores cuyos pesos varían. Escala del EAPI es de 0-1, donde 1 es el valor deseado.	Valorar la utilidad de la transición energética de los países hacia sistemas de energía más sostenibles, asequible y segura.	$\frac{CED + SAA + S.E}{3}$	127 países de forma individual-Ranking Mundial
Índice de Riesgo de Seguridad Energética (Institute for 21st Century Energy, 2013).	Se usan 37 indicadores para calcular 9 categorías, las cuales se agrupan en los siguientes sub-Índices: Geopolítica (G), Economía (E), Confiabilidad (C) y Medio Ambiente (M.A). Un índice de 100% indica el mayor de los riesgos.	Determinar la vulnerabilidad de Estados Unidos en un mercado de energía global	$0.3 * G + 0.3 * E + 0.2 * C + 0.2 * M.A$	Estados Unidos
Índice Nelson de Complejidad (NCI) (Nelson, 1960)	Asigna un factor de complejidad a cada parte (planta) de la refinería de acuerdo con la complejidad y el costo comparándolo con la destilación de crudo. A mayor índice, mayor complejidad, lo cual indica mayor cantidad de productos ligeros de petróleo que se obtienen del proceso.	Cuantificar la flexibilidad de las refinerías, lo cual determina el grado de sofisticación de una refinería.	Agregado	Unión Europea; Utilizado en el modelo de S.E de la IEA (MOSES)
Índice de Desbalance (Yao & Chang, 2014)	Los indicadores se agrupan en cada una de las dimensiones en las cuales se enmarca la S.E: Disponibilidad, Asequibilidad, Aplicabilidad y Aceptabilidad. A su vez éstas se usan para calcular áreas para determinar el grado de desbalance al compararse con la situación ideal de todas las dimensiones Escala 0 a 1: Un índice cercano a 1 indica desbalance.	Identificar anualmente las dimensiones en las cuales hay mayor desbalance en S.E.	$1 - \frac{\text{Área rombo}_{\text{año } i}}{\text{Área rombo}_{\text{ideal}}}$	China

2.4 Modelos de seguridad energética

Una de las ventajas de proponer un modelo de S.E es la disponibilidad de diferentes métodos, tanto cualitativos como cuantitativos, con los cuales es posible determinar el estado de la S.E. Por ejemplo, la metodología de análisis de impacto cruzado (CIA) apoya la toma de decisiones al determinar la relación y dirección (influencia a, influenciada por) que tienen las dimensiones del sistema eléctrico entre sí; a través de identificar los aspectos que tienen mayor efecto sobre otros elementos, para enfocar las acciones deseadas y lograr seguridad en el suministro de electricidad (Osorio, van Ackere, & Larsen, 2016).

Por su parte, los modelos cuantitativos establecen matemáticamente las relaciones entre las variables existentes en el sistema. Además, de obtener proyecciones en una escala de tiempo que pueda ser relevante para el estudio.

La revisión de literatura para identificar los diferentes modelos que cuantifican la S.E se presentan en la Tabla 2-3, en la cual se resumen los resultados obtenidos en las bases de datos ScienceDirect y Scopus a partir del criterio de búsqueda: (“Energy Security”) AND (“Model”) AND (“supply”) AND/OR (“Gas”): Si bien cada tipo de modelo puede ser o ha sido utilizado para apoyar la toma de decisiones y análisis de políticas en el sector energético (u otros sistemas en general), en la Tabla 2-3 se recopilan las aplicaciones orientadas específicamente a la S.E.

Tabla 2-3: Modelos utilizados en la literatura para evaluar la S.E.

Referencia	Modelo base	Metodología	Descripción
(García-Gusano, Iribarren, & Garraín, 2017)	The Integrated MARKAL-EFOM System (TIMES).	Optimización	Modelo de planeación del sistema energético. Busca determinar la combinación de tecnologías y combustibles que satisface la demanda y a su vez cuantificar las emisiones.
(deLlano-Paz et al., 2016)	Markowitz	Optimización	Define un portafolio de productos diversificados. Permite obtener una combinación de activos que pueden hacerse en una zona de factibilidad teniendo en cuenta los costos de producción y el porcentaje de participación de cada tecnología en la matriz energética.
(Kim et al., 2011)	Long-range Energy	Optimización/Simulación	Permite estructurar el uso de los energéticos en el largo plazo. Incluye evaluación de las

Tabla 2-3: Modelos utilizados en la literatura para evaluar la S.E.

Referencia	Modelo base	Metodología	Descripción
	Alternative Planning System (LEAP)		metas de reducción de emisiones de CO ₂ . En los escenarios propuestos es posible destacar el uso de una fuente primaria de energía de acuerdo con la disponibilidad o interés particular.
(Glynn et al., 2017)	Irish TIMES	Optimización/ Simulación	Se analiza el sistema energético a través del cálculo de un único índice el cual considera diferentes fuentes de energía. Se aplica información técnica y económica para aproximadamente 1600 tecnologías energéticas tanto del lado de la oferta como de la demanda, y se evalúan escenarios en los cuales el principal objetivo es disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero.
(Criqui & Mima, 2012)	Prospective Outlook on Long-term Energy System (POLES)	Simulación	Hace un inventario de las emisiones de gases de efecto invernadero de acuerdo a los diferentes escenarios de consumo. Tiene en cuenta los mercados de las fuentes de origen fósil y evalúa la sostenibilidad de los energéticos.
(Chyong Chi, Nuttall, & Reiner, 2009)		Dinámica de sistemas	Diseño de políticas en la industria del gas natural. El análisis se hace principalmente sobre las relaciones causales en los subsectores de exploración y producción las cuales son impulsadas por la sustitución y el consumo.
(Pan, Liu, & Li, 2017)		Dinámica de sistemas	Calcula la S.E y determina el impacto que tienen sobre ella, los seis indicadores predefinidos. Utiliza un enfoque subjetivo, al introducir la opinión de expertos respecto al peso que debe tener cada indicador en el índice y su importancia en el sistema.
(Wang & Zhou, 2017)		Estadístico: Principal Components Analysis (PCA)	Se identifican las debilidades de los sistemas energéticos, principalmente de las dimensiones definidas. Utiliza una metodología de carácter subjetivo/objetivo para evaluar el desempeño de los países.
(Radovanović, Filipović, & Pavlović, 2017)		Estadístico: Principal Components Analysis (PCA)	Evalúa el efecto individual de un determinado indicador sobre el índice de Seguridad Energética. Es así como se consigue identificar los indicadores relevantes dentro del análisis a realizar.
(Tongsopit, Kittner, Chang, Aksornkij, & Wangjiraniran, 2016)		Analítico-económico	Busca representar el estado de la seguridad energética a través del cálculo de un índice definido por cuatro dimensiones. La diversidad de los indicadores que se presentan es una representación del estado de la S.E centrándose en los puntos más críticos que presentan una tendencia general.
(Narula, Sudhakara)	Matriz de Puntuación y	Análisis Multicriterio	El análisis del índice anual establece el impacto individual de cada indicador sobre la

Tabla 2-3: Modelos utilizados en la literatura para evaluar la S.E.

Referencia	Modelo base	Metodología	Descripción
Reddy, Pachauri, & Mahendra Dev, (2017)	Matriz de Ponderación	Discreto	Seguridad Energética. La metodología permite el uso de tres dimensiones, además de comparar sistemas energéticos entre países y determinar las principales fortalezas y debilidades.
(Su et al., 2017)	ENA: Ecological Network Analysis	De redes	Evalúa la seguridad del suministro de dos fuentes primarias: petróleo y gas natural. Se implementan en la plataforma diferentes escenarios con los cuales se proponen acciones de mejora los niveles de seguridad en el suministro. Permite identificar y cuantificar relaciones entre los diferentes subsistemas implicados en la cadena de cada energético.

Los objetivos de las diferentes metodologías utilizadas para evaluar la S.E (Tabla 2-3), se pueden resumir como:

- Los modelos de optimización se usan para especificar las acciones que permitan cumplir con un objetivo específico. En los casos de estudio se determina la factibilidad de las diferentes fuentes energéticas cuyo fin es la reducción de las emisiones de CO₂ (deLlano-Paz et al.; 2016; García-Gusano et al., 2017; Glynn et al., 2017; Kim et al., 2011).
- Los modelos de simulación buscan reproducir el comportamiento del sistema energético el cual incluye incertidumbre. Se evalúa el comportamiento en el largo plazo utilizando la expresión lógica: Si/Entonces (Criqui & Mima, 2012; Glynn et al., 2017; Kim et al., 2011).
- Los modelos en dinámica de sistemas replican el comportamiento del sistema (Ejemplo: país, región o cadena de suministro) a partir de la relación causa-efecto de las diferentes variables implicadas. Además, a través de la implementación de políticas se puede conocer el efecto en el corto o largo plazo (Chyong Chi et al.; 2009; Pan et al., 2017).
- Los modelos estadísticos por su parte calculan un único índice por país o región a partir de la aplicación de diferentes indicadores; con ello se logra determinar la importancia de cada indicador en el índice y de acuerdo con los valores obtenidos tomar decisiones. Una de las ventajas de este tipo de modelos es que se pueden aplicar métricas objetivas y subjetivas (Radovanović et al.; 2017; Wang & Zhou, 2017).

- Los modelos de redes se hacen a partir de la construcción de una red o diagrama de los vínculos que existen entre los diferentes actores (internos y externos) y cuantifican en indicadores las respectivas relaciones, con ello se define el grado y el tipo de relación entre las diferentes partes del sistema(Su et al., 2017).
- El propósito de un modelo analítico económico es identificar las debilidades y fortalezas de un sistema a partir del cálculo de indicadores utilizados para cuantificar un único índice(Tongsopit et al., 2016).
- En el análisis multicriterio se utiliza para evaluar las diferentes posibles soluciones a un problema en específico, con lo cual se busca encontrar la mejor solución (Narula et al., 2017).

Se identificó que los modelos utilizados están acompañados en un 50% de una metodología objetiva, en la cual se usa sólo un lenguaje más formal de tipo matemático; el 50% restante es de carácter objetivo/subjetivo, es decir, adicionalmente reconoce la importancia de incluir la opinión de expertos de las diferentes disciplinas para cuantificar los parámetros de interés de la seguridad energética o ésta misma. En la revisión bibliográfica se tuvo en cuenta el tipo de energético que se utilizaba para cada caso, se encontró que hay preferencia por evaluar la matriz energética, la cual fue considerada en el 58% de los estudios; estuvo por encima de una única fuente de energía: 17% trataron sólo fuentes renovables, mientras el 23% fuentes fósiles (en igual porcentaje el petróleo y el gas natural). El gas natural como tema de interés en este documento fue modelado por Chyong Chi et al. (2009) quienes evalúan la cadena de suministro del gas natural en el Reino Unido bajo diferentes escenarios. Mientras que en China la mayor preocupación está en la seguridad del suministro del petróleo y gas natural principalmente (Su et al., 2017).

Un 33% de los estudios presentados se basan en una línea de tiempo de corto plazo, mientras que el 67% tienen una visión de largo plazo. En la Tabla 2-4 se resume la revisión bibliográfica de acuerdo con el sector de la cadena de suministro en el que se enfoca el estudio o si es el caso en la cadena completa. Además, se menciona el lugar geográfico de aplicación y si se hace algún tipo de comparación. Las dimensiones en las cuales se enmarca cada caso de estudio también son incluidas; así como el tipo de energético, si es

uno en particular o si se utiliza de forma general para las diferentes fuentes de energía primaria del sistema.

Tabla 2-4: Clasificación en la cadena de suministro de las referencias bibliográficas que usan modelos de S.E.

Referencia	Obtención	Transformación	Generación	Almacenamiento	Consumo	Cadena completa	Energético	País/Región de Aplicación	Comparación	Dimensiones
(García-Gusano et al., 2017)			X		X		Renovables	España, Noruega	Individual / otros países de la región.	4 A's
(Kim et al., 2011)			X		X		Matriz energética	Corea del Sur	Solo el país.	4 A's
(deLlano-Paz et al., 2016)			X				Renovables	Unión Europea	Entre países de la Unión Europea.	Seguridad, sostenibilidad, competitividad y asequibilidad
(Chyong Chi et al., 2009)						X	Gas Natural	Reino Unido	Comparación Individual.	Relaciones de causa de efecto
(Criqui & Mima, 2012)	X				X		Matriz energética	Europa	Entre países de la región y el mundo en general.	4 A's
(Wang & Zhou, 2017)						X	Matriz energética	Europa, Asia, África, Norte América	Individual y con otras regiones.	Seguridad y entrega de suministro, certeza en uso de energía, estabilidad política, socioeconómica y ambiental.
(Radovanović et al., 2017)			X		X		Matriz energética	Europa	Individualmente y con otros de la zona.	18 dimensiones: 4 A's, RRS y otras.
(Narula et al., 2017)	X						Matriz energética	India	El mismo país.	Disponibilidad, aceptabilidad, Asequibilidad y Eficiencia.
(Pan et al., 2017)		X		X			Petróleo	China	El mismo país.	Cadena de suministro

Tabla 2-4: Clasificación en la cadena de suministro de las referencias bibliográficas que usan modelos de S.E.

Referencia	Obtención	Transformación	Generación	Almacenamiento	Consumo	Cadena completa	Energético	País/Región de Aplicación	Comparación	Dimensiones
(Su et al., 2017)	X						Petróleo y gas natural	China	El mismo país.	Eficiencia y Resiliencia
(Glynn et al., 2017)						X	Matriz energética	Irlanda	El mismo país	RRS
(Tongsopit et al., 2016)						X	Matriz energética	ASEAN	Sólo la región.	Asequibilidad, Aceptabilidad, Adaptabilidad y Disponibilidad
Total	3	1	4	1	4	5				

La revisión de literatura también ha tenido como objetivo identificar los documentos cuyo caso de aplicación es Colombia; se identificó que existen dos documentos relacionados directamente con el tema: En el informe más reciente se hace la revisión de literatura del concepto de S.E para posteriormente definirlo en el contexto colombiano teniendo en cuenta los diferentes sectores: “consiste en satisfacer las necesidades energéticas de forma confiable, accesible, asequible, adaptable y aceptable social y ambientalmente” (UPME & CIDET, 2017). Si bien el estudio no da pasos más allá de lo teórico, el concepto de S.E ha sido propuesto como un primer esfuerzo para la construcción del concepto a nivel del país manteniendo como eje principal el abastecimiento energético. Por otra parte, la investigación presentada por Villada & Olaya (2011) proponen un modelo de simulación en el cual se evalúa el suministro del gas natural modelado desde la etapa de producción hasta los puntos de entrega en las principales ciudades (City Gate), con el fin de evaluar la congestión que se presenta en el sistema de transporte, lo cual afecta el desempeño del mercado (primario y secundario). Sin embargo, el estudio se enfoca en analizar sólo el mercado del gas natural, la demanda no es diferenciada por sector de consumo y el alcance es para el corto plazo.

Para continuar con los propósitos de este trabajo, es necesario definir el foco de la S.E en el caso colombiano a partir de las ideas obtenidas a lo largo de este capítulo teniendo como único objetivo la cadena del suministro del gas natural. La definición dada por la UPME

(2016) para el sistema energético colombiano es: "Satisfacer las necesidades energéticas de forma confiable, accesible, asequible y aceptable social y ambientalmente", de donde es claro que las dimensiones de la S.E son: Confiabilidad, Accesibilidad, Asequibilidad y Aceptabilidad. Sin embargo, la dimensión de *confiabilidad* es abordada desde el desempeño de los elementos que componen el sistema, aunque la pertinencia de esta dimensión en el sector del gas natural está incompleta, porque ante un escenario cercano de desabastecimiento, la interrupción del suministro no está relacionada únicamente con los estándares sino con la disponibilidad geológica del recurso para su explotación, por lo que dicho aspecto se reemplazará por *disponibilidad*. Las demás dimensiones serán abordadas a la luz del plan energético para Colombia en el 2050 (UPME, 2015c):

- Seguridad del suministro y diversificación de la canasta: Lo cual incluye la confiabilidad y calidad del servicio. Además de cubrimiento de la demanda
- Asequibilidad al servicio y equidad social: Universalización del servicio y, costos de la energía y capacidad de pago
- Impactos de obras de infraestructura: Mitigación de impactos ambientales y de efectos negativos del cambio del clima (Eficiencia energética, energías renovables, bajas emisiones de CO₂ y reducción de vulnerabilidad). Además, contempla la generación de valor en obras de infraestructura y reducción de efectos negativos sobre las comunidades.

A partir del plan energético se plantean las dimensiones para Colombia, las cuales están vinculadas con aspectos claves, los cuales coinciden con la definición de las 4 A's de Kruyt et al. (2009):

- Disponibilidad (Availability): Está determinada principalmente por la geología, dado que el gas natural es no renovable y se obtiene de un yacimiento. La existencia del recurso en esta primera etapa posibilita que esté preparado para el resto de la cadena.
- Accesibilidad (Accessibility): Hace referencia a la infraestructura instalada tanto para la obtención, como para el transporte y almacenamiento del gas natural; incluye la infraestructura de importación. Este factor principalmente es de naturaleza física y geopolítica.
- Asequibilidad (Affordability): De ella hacen parte todos los mecanismos económicos.
- Aceptabilidad (Acceptability): Ligado a la sociedad y al medio ambiente.

2.5 Conclusiones

En cuanto a la definición del modelo para el caso de estudio, podría decirse que los obtenidos a partir de la revisión de literatura resultan convenientes porque han sido implementados para estimar la S.E permitiendo hacer un análisis a partir de un conjunto de métricas predefinido. Sin embargo, de acuerdo a los objetivos planteados se debe aplicar la metodología seleccionada, de la cual se tratará en próximos capítulos, aquella que permita evaluar la cadena del suministro teniendo en cuenta específicamente cada una de las etapas, además que la aplicabilidad debe ser de largo plazo y para un solo tipo de energético, que para este caso particular es el gas natural.

La conceptualización de la S.E puede darse en dos sentidos, a partir de una definición formal de la cual se desprendan los indicadores necesarios para su posterior evaluación, o desde las métricas hacia el concepto con lo cual se hace una delimitación aceptada y exacta del concepto.

3. Indicadores e índice de seguridad energética en la cadena de suministro del gas natural en Colombia

En el capítulo 3 se presenta la metodología empleada para definir los indicadores de S.E para Colombia y el cálculo de un único índice que permita determinar el estado de la cadena de suministro en el país. Al final se presentan los resultados y las conclusiones.

3.1 Metodología

3.1.1 Definición de Indicadores

La selección de los indicadores para Colombia se hizo siguiendo los siguientes pasos:

- Búsqueda en la literatura de indicadores de S.E.
- Clasificación de los indicadores de acuerdo con su aplicabilidad en las diferentes fuentes de energía primaria.
- Definición de la fórmula de cálculo de cada indicador.
- Búsqueda de datos históricos que permitan calcular cada uno de los indicadores definidos en el paso anterior.
- Filtrar los indicadores apropiados para el caso colombiano.
- Seleccionar los indicadores de S.E aplicables a la cadena de suministro del gas natural.
- Cálculo de indicadores de S.E de la cadena de suministro del gas natural en Colombia de acuerdo con la información disponible.
- Selección de indicadores primarios, los cuales se definen como aquellos que son usados para calcular otros indicadores de S.E. Para hacer esta distinción se analizó la fórmula de cálculo de cada indicador y así se determinó si había dependencia a alguno de los indicadores del listado. En la Figura 3-1 se muestra el ejemplo del indicador secundario Margen de abastecimiento de G.N, el cual depende de la producción y el consumo de gas natural para ser calculado.

Figura 3-1: Ejemplo de construcción de matriz de indicadores primarios.

Ejemplo: Margen de abastecimiento de g.n = $\frac{\text{Producción interna}_{\text{máx}} - \text{Consumo interno}_{\text{máx}}}{\text{Producción interna}_{\text{máx}}}$

Indicadores	1	2	3. Producción de gas natural	4	.	.	.	n
1								
2								
3								
4								
7. Consumo de gas natural								
.								
.								
.								
n								

- Planteamiento de indicadores preliminares de S.E en una matriz N x N, donde N es el número posibles indicadores primarios de gas natural especificados para Colombia. Cada indicador debe aparecer tanto en la primera fila como en la primera columna de la matriz. Se evalúa para cada indicador de la primera columna utilizando la fórmula, si hay dependencia con indicadores de la primera fila y se marcó con una “X” los casos en que así sucedía.
- Sumar la cantidad de “X” por columnas y selección de indicadores primarios como aquellos cuyo total de indicadores dependientes es mayor.
- Asociar los indicadores con la cadena del suministro del gas natural en Colombia, indicando a qué parte de ésta pertenecen o para cual se calculan.

3.1.2 Índice de desbalance

La primera parte del cálculo de un índice de S.E para Colombia, radica en determinar qué índice es apropiado para aplicarse al caso de estudio. De acuerdo con las características, el objetivo y la aplicabilidad de cada uno de los índices que se encontraron en la literatura (sección 2.3.2); se determinó que el índice propuesto por Yao & Chang (2014), puede ser aplicado para el propósito de esta investigación, primero porque lleva implícita la flexibilidad de las dimensiones en las cuales se enmarque la S.E y segundo, porque se pueden determinar las debilidades, vulnerabilidades y fortalezas del sistema en evaluación. Además, aún no ha sido utilizado en el sistema energético colombiano, por lo que podría arrojar una perspectiva diferente a los índices ya conocidos.

Una vez definido que se aplicará el índice de desbalance para la cadena de suministro del gas natural, a continuación, se detalla la metodología para tal fin:

- Determinar las dimensiones en las cuales se va a enfocar la S.E para el caso de estudio. Aunque el trabajo presentado por Yao & Chang (2014) enmarca la seguridad energética en cuatro dimensiones: Asequibilidad, Aceptabilidad, Aplicabilidad y Disponibilidad para el caso de estudio se aplicarán las perspectivas que ya han sido justificadas y predefinidas para Colombia (p. 35): Disponibilidad, Accesibilidad, Asequibilidad y Aceptabilidad.
- Clasificar los indicadores seleccionados (obtenidos de la metodología de la sección 3.1.1) en cada una de las dimensiones previamente concretadas.
- Buscar información histórica para el período 2010-2016. Calcular los indicadores para cada año.
- Aplicar a todos los indicadores la ecuación (3-1) con el fin de eliminar unidades y darle una escala cuantitativa (entre 1 y 10, donde 10 corresponde al mayor nivel).

$$X' = 1 + \frac{(X - X_{min})}{(X_{max} - X_{min})} * (10 - 1) \quad (3-1)$$

- Se calculan las dimensiones de S.E ponderando los indicadores con el mismo peso. Se define el valor máximo de cada dimensión para el periodo calculado.
- Se calcula el área de un rombo por cada año para cada dimensión utilizando la ecuación (3-2). Además, se define un rombo ideal cuyas diagonales son los valores máximos de cada una de las dimensiones.

$$\text{Área Rombo} = \frac{1}{2} * (Dimensión_1 + Dimensión_2) * (Dimensión_3 + Dimensión_4) \quad (3-2)$$

- Se calcula el índice de desbalance utilizando la ecuación (3-3).

$$\text{Índice de Desbalance(I. D)} = \frac{\text{Área rombo}_{ideal} - \text{Área rombo}_{periodo i}}{\text{Área rombo}_{ideal}} \quad (3-3)$$

El índice de desbalance está en escala de 0 a 1, donde 0 corresponde a un estado de balance y 1 de desbalance.

3.2 Indicadores de S.E para Colombia

En el marco del Convenio Especial de Cooperación de Ciencia y Tecnología Número 12 de 2016 entre la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) y el Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Sector Eléctrico (CIDET).se hizo la selección de los indicadores apropiados para el caso colombiano (UPME & CIDET, 2017), comenzando con la búsqueda en la base de datos Scopus, usando el criterio de búsqueda: "energy security" and "indicator" and case of study. Las fuentes de información que se obtuvieron se listan en la Tabla 3-1 ordenadas de acuerdo con el número de citas y el listado completo se encuentra disponible en el Anexo B.

Tabla 3-1: Revisión bibliográfica para identificar indicadores de seguridad energética.

Título completo	Palabras Clave	Autores	Caso de estudio	Fecha/Tipo de publicación	Fuente	Número de citas
1. Indicators for energy security	Seguridad Energética, seguridad de suministro, indicadores	Kruyt B, van Vuuren D, de Vries & Groenenberg H	Países Bajos	Ene-09/ Paper	Energy Policy	251
2.Global Energy Assessment - Chapter 5: Energy and Security	Energía global, seguridad energética	Cherp, A., A. Adenikinju, A. Goldthau, F. Hernandez, L. Hughes, J. Jansen, J. Jewell, M. Olshanskaya, R. Soares de Oliveira, B. Sovacool and S. Vakulenko,	Reino Unido/ Estados Unidos/ Austria	2012/ Capítulo Libro	International Institute for Applied Systems Analysis	140
3.Conceptualizing Energy Security	Seguridad energética, seguridad en el suministro, medición, definición, concepto, revisión de literatura	Winzer C.	Reino Unido	Jul-11/ Paper	Cambridge Working Paper in Economics	135
4.Energy security: Definitions, dimensions and indexes	Seguridad energética, indicadores, índices de seguridad energética.	Ang B.W., Choong W.L & Ng T.S.	Singapur	Ago-14/ Paper	Renewable and Sustainable Energy Reviews	106
5. Security of energy supply: Comparing	Seguridad Energética, escenarios de	Costantini V, Gracceva F,	Italia	Ene-07/ Paper	Energy Policy	99

Tabla 3-1: Revisión bibliográfica para identificar indicadores de seguridad energética.

Título completo	Palabras Clave	Autores	Caso de estudio	Fecha/Tipo de publicación	Fuente	Número de citas
scenarios from a European perspective	energía y mercados de energía	Markandya A, Vicini G.				
6.Indicators of energy security in industrialised countries	Seguridad energética, indicadores, importaciones de energía.	Löschela A, Moslenerb U, Rübhelke D.	Alemania/ Noruega	Abr-10/ Paper	Energy Policy	93
7. Long-term energy services security: What is it and how can it be measured and valued?	Seguridad Energética de servicios, índice base de diversidad, índice Suministro/Demanda	Jansen J & Seebregts A.	Países Bajos	Abr-10/ Paper	Energy Policy	80
8.Economic growth, sustainable development and energy security interrelations	Crecimiento económico, desarrollo sostenible, seguridad energética, intensidad energética, competitividad.	Vosylius E, Rakutis V & Tvaronavičienė M.	Lituania	Dic-12/ Paper	Journal of Security and Sustainability Issues	41
9.Energy demand and supply, energy policies, and energy security in the Republic of Korea	República de Corea, seguridad energética, futuro energético de la RC.	Hoseok K, Eui-soon S, Woo-jin C.	Corea	Nov-11/ Paper	Energy Policy	34
10.An assessment of Taiwan's energy policy using multi-dimensional energy security indicators	Seguridad energética, política energética de Taiwán, indicador de seguridad energética.	Ming C.C &Hwong W.M.	Taiwán	Ene-13/ Paper	Renewable and Sustainable Energy Reviews	29
11.The challenging economics of energy security: Ensuring energy benefits in support to sustainable development	Seguridad energética, políticas energéticas, desarrollo sostenible.	Blum H & Legey L.	Brasil/ USA	Sep-16/ Paper	Energy Economics	29
12.Addressing 2030 EU policy framework for energy and climate: Cost, risk and energy security issues	Eficiencia de la teoría de portafolio, emisiones de CO2, fuentes renovables de energía, objetivos de	deLlano-Paz F, Martínez P & Soares I.	España/ Portugal	Ene-16/ Paper	Energy	9

Tabla 3-1: Revisión bibliográfica para identificar indicadores de seguridad energética.

Título completo	Palabras Clave	Autores	Caso de estudio	Fecha/Tipo de publicación	Fuente	Número de citas
	unión energética, seguridad en el suministro.					
13. An assessment of Indonesia's energy security index and comparison with seventy countries	Índice de seguridad energética, Indonesia, Análisis de componente principal.	Febrilian Q, Wahyu W & Sudibandriyo M.	Indonesia	May-16/ Paper	Energy	8
14. A SES (sustainable energy security) index for developing countries	Seguridad energética sostenible, mediciones, índice.	Narula K & Sudhakara A.	India	Oct-15/ Paper	Energy	8
15. Concept for Energy Security Matrix	Seguridad energética, indicadores, resiliencia, adecuación, dependencia, afectabilidad.	Kisel E, Hamburg A, Härm M, Leppiman A, Ots M.	Estonia/ Reino Unido	Ago-16/ Paper	Energy Policy	4

De la revisión bibliográfica se obtuvo un total de 80 indicadores aplicables a las fuentes de energía primaria, vale la pena aclarar que un solo indicador puede ser aplicable a diferentes fuentes a la vez, por ejemplo: Generación de energía eléctrica a partir de la fuente i. El siguiente paso fue definir para cada uno de los indicadores la fórmula matemática. A continuación, y como parte final del convenio mencionado anteriormente, se hizo un sondeo con un grupo de expertos en el sector energético de los indicadores aplicables al sector energético colombiano utilizando como criterios de selección principal, primero el conocimiento en el sector y segundo, se hizo el análisis tanto de la fórmula como de la disponibilidad de los datos requeridos para calcular cada indicador (UPME & CIDET, 2017). La posterior distinción que se hizo fue especificar cuáles estaban relacionados directamente con la cadena del suministro del gas natural; al aplicar este filtro se obtuvieron 39 indicadores para el gas natural.

Se hizo la búsqueda formal de la información necesaria para calcular cada uno de los indicadores de seguridad energética para el gas natural (G.N), la cual se obtuvo de:

agencias gubernamentales, compañías del sector privado y asociaciones de éstas. Los datos para el periodo de estudio 2010-2016 fueron obtenidos de los siguientes portales: ANDEG, SIEL, Unidad de Planeación Minero-Energética, Ministerio de Minas y Energía, Bolsa Mercantil de Colombia, CONCENTRA, PROMIGAS, Asociación Nacional de Hidrocarburos, Transportadora de Gas Internacional (TGI), PROGASUR, CBC, Ecopetrol, IndexMundi, FENOSA, BP, Banco de la República.

En la búsqueda de información surgieron algunas limitantes como, por ejemplo, algunos datos históricos no están disponibles para el público en general. Dadas estas restricciones, se tomó la decisión de redefinir dichos indicadores con base en la información que, aunque limitada, si es de dominio del público. Por ejemplo, Eficiencia de cambio de termoeléctricas de G:N pasó a ser eficiencia de termoeléctricas que usan G.N.

Algunos otros indicadores resultaban ambiguos en su interpretación por lo que se refinó el nombre del indicador. Por ejemplo, Capacidad instalada termoeléctricas -Gas y/o Líquidos- pasó a ser Capacidad de generación de centrales térmicas que usan Gas y/o Combustibles líquidos. Adicionalmente, se dedujo que el PIB per cápita y el tamaño de la población son dos parámetros frecuentemente utilizados para el cálculo de indicadores como intensidad energética y consumo promedio per cápita, por lo que se denominaron variables impulsadoras y se extraen de los posteriores filtros, pero se incluirán al final en el listado de indicadores primarios.

El listado de los 32 indicadores de S.E para la cadena de suministro del G.N en Colombia se muestra en la Tabla 3-2, los cuales se consideran como finales para esta primera etapa de selección. En la Tabla 3-2 se determina para cada indicador una breve descripción, la fórmula de cálculo, las unidades, se indica si se hizo alguna redefinición (con la letra R) y el valor promedio para el periodo 2010-2016.

Tabla 3-2: Indicadores de seguridad energética predefinidos para la cadena de suministro del gas natural en Colombia

INDICADOR (R: Redefinido)	DESCRIPCION	UNIDADES	FORMULA	Promedio
Capacidad de generación de centrales térmicas que usan Gas y/o Combustibles Líquidos.	Capacidad instalada nominal de termoelectricas que operan con gas natural y/o combustibles líquidos.	MW (toe)	$\sum \text{Capacidad generación central térmica}_i$	1848
R: Eficiencia de termoelectricas que usan gas	Capacidad de las centrales térmicas para convertir el gas natural a energía eléctrica.	%	$\frac{W_{GEN} + \sum Q_{THGN}}{Q_{GN}}$	38,21
R: Consumo de combustibles líquidos de centrales térmicas	Uso de combustibles líquidos en centrales térmicas de ciclo simple y combinado.	MBTU (toe)	$\sum \text{Consumo de combustible}_{\text{planta térmica}}$	10603628,68
R: Niveles de almacenamiento de GNL	Volumen de GNL que puede ser almacenado para atender las interrupciones de suministro.	MPCD	$\sum \text{Niveles de almacenamiento}_{\text{GNL}}$	0
Días de almacenamiento de GNL	Días de consumo de gas natural que pueden ser suplidos por las reservas de almacenamiento de GNL.	días	$\frac{\text{Volumen GNL almacenado}}{\text{Consumo promedio de GN}}$	0
Capacidad interrumplible de contratos de gas	Cantidad de gas natural que se comercializa sin compromiso, es decir que el servicio puede ser suspendido por cualquiera de las dos partes, en cualquier momento, bajo cualquier circunstancia con previo aviso.	GBTUD	$\sum \text{Energía contratada con interrupciones}_{\text{campo i, GN}}$	21417077,96
Demanda promedio en mes pico	Demanda promedio de gas natural en mes pico	MBTU	$\sum \text{Consumo promedio mensual}_{\text{GN}}$	7821217,921
Producción acumulada mensual máxima por año	Producción máxima mensual de gas natural alcanzada en el periodo de un año.	MPCD	$\text{Max}(\text{Producción acumulada mensual})_{\text{año i}}$	1059
R: Diversidad de proveedores de gas natural	Medida de variedad y balance de proveedores de gas natural (productores e importadores).	Adimensional	$H = - \sum_i p_i \ln p_i$	1,20
Diversidad de modos de transporte de gas natural	Medida de variedad y balance entre diferentes modos de transporte de gas natural.	Adimensional	$H = - \sum_i p_i \ln p_i$	0
Diversidad de producción de gas natural por campo	Medida de variedad y balance de producción de gas natural por campos a nivel nacional.	Adimensional	$H = - \sum_i p_i \ln p_i$	1,07
Diversidad de fuentes de generación de energía eléctrica	Medida de variedad y balance entre las diferentes fuentes de generación de electricidad.	Adimensional	$H = - \sum_i p_i \ln p_i$	0,75
Producción de gas natural	Se calcula la producción diaria de gas natural para consumo en cada campo del país.	MPCD	$\sum \text{Producción de gas}_{\text{campo i}}$	2834
Reservas de gas natural	Hace referencia a las reservas recuperables (probadas, probables y posibles) de gas natural para el consumo.	GPC	$\sum \text{Reservas recuperables de gas}_{\text{campo i}}$	6606,2
Tasa de reservas a producción de gas natural	Determina la cantidad de años con los que el país cuenta con suministro de gas natural de acuerdo a las reservas probadas y a su producción.	Años	$\frac{\text{Volumen de Reservas de gas natural}_{\text{año i}}}{\text{Producción nacional de gas natural}_{\text{año i}}}$	15,9

Tabla 3-2: (Continuación)

INDICADOR (R: Redefinido)	DESCRIPCIÓN	UNIDADES	FÓRMULA	Promedio
Tasa de reservas a consumo de gas natural	Determinar la cantidad de gas natural que se encuentra en los yacimientos con respecto al consumo diario del país.	Años	$\frac{\text{Reservas de gas natural}}{\text{Consumo nacional de gas natural}}$	16,7
Margen de abastecimiento de gas	Permite calcular la diferencia entre la oferta máxima y la demanda máxima de gas natural.	%	$\frac{\text{Producción interna máx} - \text{Consumo interno máx}}{\text{Producción interna máx}}$	0,6
Porcentaje de uso de gasoductos	Determina el porcentaje de uso de los gasoductos con respecto a su capacidad.	%	$\frac{\text{Volumen de gas transportado}}{\text{Capacidad de transporte del gasoducto}}$	58
Contratos a largo plazo de importaciones gas	Cantidad de contratos en firme pactados para suministrar gas natural al mercado interno, el cual se hará efectivo en un periodo de tiempo.	# Contratos	$\sum \text{contratos de importación de g.n}$	---
Capacidad de importación de la red nacional de gasoductos	Calcular la capacidad volumétrica de los gasoductos para la importación de gas natural.	MPCED	$\sum \pi r^2 l$	371/480
R: Infraestructura de interconexión	Infraestructura de conexión del sistema nacional de gasoductos.	km	$\sum \text{Longitud gasoducto instalado tramo } i$	3778
R: Infraestructura de GNL	Permite calcular la capacidad del sistema de GN y determinar la cantidad de GN disponible para el consumo.	MPCD	$\sum \text{Capacidad volumétrica tramo } i$	2713
R: Facturación de importaciones netas de gas	Facturación de importaciones netas de gas	\$	$\sum \text{Costo de importación gas natural contrato } i$	0,0
Precios promedio de gas natural	Compara los precios del gas y su volatilidad en diferentes periodos de tiempo.	\$/MBTU	$\sum \frac{\text{Precio de gas natural por unidad energía}_i}{\# \text{ de periodos estudiados}}$	7292
Exportaciones netas de gas natural	Definir el porcentaje de exportaciones respecto a la demanda interna total de petróleo.	MPCD	$\frac{\text{Volumen de Exportación de g.n diaria}}{\text{Volumen de demanda interna diaria de g.n periodo } i}$	147,6
Importaciones de gas natural	Calcular el volumen de gas natural importado, respecto a la oferta del energético para consumo interno.	%	$\frac{\text{Volumen de gas natural importado}}{\text{Volumen de oferta interna de gas na}}$	0,0
Intensidad energética Gas Natural: consumo de Gas Natural per cápita	Es la relación entre consumo energético y el volumen de la actividad económica. Se calcula como: el cociente entre el consumo del gas y PIB (válido tanto para moneda corriente como para constante)	cpcd/\$ (const o ctes)	$\frac{\text{Consumo de gas natural}}{\text{PIB}_{\text{moneda corriente o constante periodo } i}}$	0.21/1.48
Intensidad energética Gas Natural: Consumo de Gas Natural per cápita	Es la relación entre consumo de gas natural y el número de habitantes del país.	Mpc/hab	$\frac{\text{Consumo de gas natural}}{\text{Número de habitantes periodo } i}$	7,44
Consumo de gas por sector	Se calcula y reconoce el consumo de gas natural de cada sector.	%	$\frac{\text{Consumo total de gas natural periodo } i}{\text{Consumo total de gas en el sector energético periodo } i}$	7
Gas usado por el sector energético	Se mide el consumo de gas natural en un sector específico.	%	$\frac{\text{Consumo total de gas periodo } i}{\text{Consumo de gas en el sector energético periodo } i}$	7
Gas para usos diferentes al sector energético	Calcular el uso del gas natural en sectores diferentes al sector energético.	%	$100 - \frac{\text{Consumo total de gas periodo } i}{\text{Consumo de gas en el sector energético periodo } i}$	6
Emisiones CO2 asociadas al g.n	Calcular y reconocer las emisiones de CO2 asociadas al consumo nacional de gas natural.	%	$\frac{(\text{Consumo g.n} * \text{Factor de emisión})}{\text{Emisiones totales}}$	0,48

Para esta tesis, de los 32 indicadores (Tabla 3-2) se preseleccionaron 21 posibles indicadores primarios usando la metodología descrita en la sección 3.1.1 y se construyó entonces la matriz 21X21, recordando que en ésta se busca cuantificar las relaciones de dependencia de cálculo entre los indicadores. Al aplicar el método de identificación, surgieron indicadores que se estimaron como parte de la definición de otro, un ejemplo de ello es el indicador *longitud de gasoductos*, el cual se asume como implícito en la capacidad de transporte. Al hacer consideraciones de este tipo se resumen los indicadores en una matriz 12X12 (Tabla 3-3), donde la primera columna corresponde al número que identifica a cada indicador, el cual es el alias o número para identificarlo en la primera columna. La Tabla 3-3 se interpreta como: las filas *se calculan a partir de*, y las columnas *definen a*. Es decir, al recorrer cada fila se encuentra con un número acompañado de la “X”, el número resume los indicadores (de los 32) relacionados con el indicador *i*, que son definidos por el indicador *j*. Un ejemplo de cómo se lee la información es: la *producción del gas natural*, el cual señala que se relaciona consigo mismo tres veces, porque éste lleva asociado los indicadores: Producción G.N, Producción acumulada mensual máxima por año de G.N y Diversidad de proveedores de G.N. Además, se indica en la celda 3X9 que la tasa de reservas a producción de gas natural relaciona tanto la producción como las reservas.

Tabla 3-3: Matriz 12X12 utilizada para la selección de indicadores primarios de la cadena de suministro de gas natural en Colombia.

i	Indicadores (j alias i)	2	3	4	5	6	7	9	11	14	15	17	19	20	Total Fila
2	Capacidad almacenamiento G.N.L						X								1
3	<i>Producción de gas natural</i>		3X				2X	X		X					7
4	<i>Precios promedio de gas natural</i>			2X											2
5	Volumen exportado de gas natural													X	1
6	Volumen importado de gas natural								X						1
7	<i>Consumo de gas natural</i>		X				7X	X							9
9	<i>Reservas de gas natural</i>							X							1

Tabla 3-3: Matriz 12X12 utilizada para la selección de indicadores primarios de la cadena de suministro de gas natural en Colombia.

i	Indicadores (j alias i)	2	3	4	5	6	7	9	11	14	15	17	19	20	Total Fila
11	Capacidad transporte red gasoductos								7X						7
14	Fuentes de generación de energía eléctrica														0
15	Modos de transporte G.N										X				1
19	Capacidad interrumpible de contratos de gas								X						1
20	Demanda G.N													X	1
Total Columna:		0	4	2	0	0	10	3	9	1	1	0	0	2	32

Se aclara que la Tabla 3-3 recoge las relaciones de los 32 indicadores de partida, es así como, por ejemplo, aunque el indicador 3 llamado *producción de gas natural* es el único mencionado en la tabla, éste lleva implícitos adicionalmente otros indicadores, como: *Producción acumulada mensual máxima por año de G.N* y *diversidad de producción de G.N (por campo)*, por lo que al final de la fila el indicador tiene siete relaciones. Al realizar la suma de todas las filas o columnas se obtiene el valor de 32, con lo que se corrobora que se tuvo en cuenta el total de los indicadores planteados para el gas natural.

Como el interés principal está en identificar los indicadores que definen la mayor cantidad de métricas, se seleccionaron sólo aquellos que se relacionan con dos o más indicadores. Es decir, aquellos en los que la suma total por columna es igual o mayor a dos, obteniendo así seis indicadores primarios. Las variables impulsadoras: PIB y población que con antelación se habían planteado como útiles para el cálculo de otros indicadores, se agregan al listado. El listado completo de los indicadores primarios es:

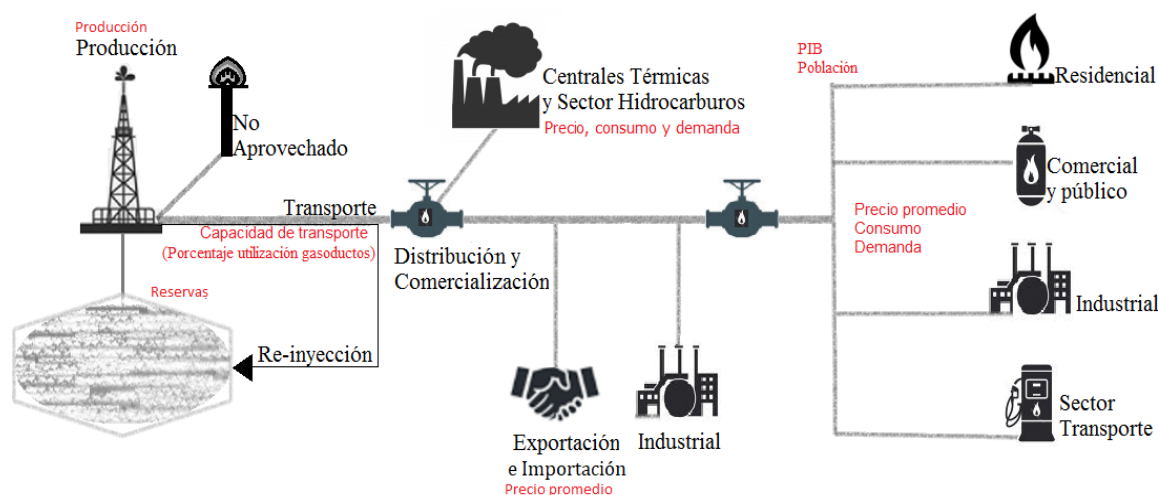
- Reservas de gas natural.
- Producción promedio de gas natural.
- Capacidad de transporte de gas natural de la red de gasoductos (% de uso de gasoductos).
- Precio promedio del gas natural.
- Consumo de gas natural.
- Demanda de gas natural.
- Producto Interno Bruto, PIB (Variable Impulsadora)
- Cantidad de habitantes-Población (Variable Impulsadora)

El indicador de capacidad de transporte es una medida que puede permanecer constante en ciertos periodos de tiempo, por lo que se contempla el *porcentaje de utilización de la red de gasoductos*, el cual se calcula como el volumen de G.N transportado dividido la capacidad de cada tramo. Este indicador puede dar indicios del comportamiento del sistema. Por ejemplo, señala un estado crítico para el suministro ya sea por exceso o por carencia. Adicionalmente, los indicadores de consumo y demanda de gas natural se definen en la literatura como indicadores diferentes, pero en la información histórica de ambos, el tratamiento de los datos es el mismo. En este capítulo, los datos utilizados para ambos parámetros serán iguales ya que el suministro de G.N ha sido suficiente para que el consumo del energético sea igual a la demanda.

Del listado de los ocho indicadores se evidencia que hay una correlación entre la población y la demanda, el PIB y el consumo y, entre la producción y el consumo (éste último no puede ser superior al suministro). Esto hace que en algunos análisis puede surgir la idea de sobreestimar un parámetro, por lo que se intentará hacer los análisis de forma particular.

Para verificar que los indicadores primarios sirven para evaluar la cadena del suministro del gas natural, es necesario verificar si estos pertenecen al menos a una parte de ésta, por lo que en la Figura 3-2 se señala la etapa que representa cada indicador.

Figura 3-2: Indicadores primarios (en rojo) para la cadena de suministro del gas natural en Colombia.



Fuente: Elaboración propia.

Con la Figura 3-2 se confirma que el conjunto de indicadores primarios sirve para analizar la cadena del gas natural porque para cada etapa se define al menos un indicador.

3.3 Índice de desbalance para la cadena de suministro del gas natural en Colombia

3.3.1 Cálculo

Como primer paso del cálculo del índice de desbalance es la definición de los aspectos de la seguridad energética de Colombia, las cuales serán llamadas de aquí en adelante como las 4 A's (por las siglas en inglés):

Disponibilidad (Availability): Relacionada a la existencia geológica,

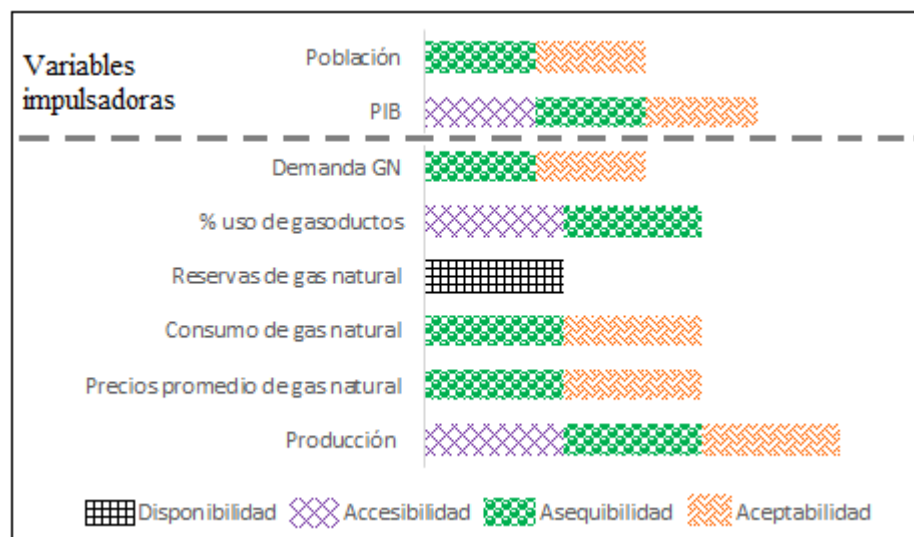
Accesibilidad (Accessibility): Incluye los elementos geopolíticos e infraestructura.

Asequibilidad (Affordability): Elementos económicos

Aceptabilidad (Acceptability): Incluye los componentes sociales y ambientales.

Como siguiente paso se determinó que se utilizarán para el cálculo del índice de desbalance, los indicadores previamente definidos como primarios. A partir del contraste de las definiciones de los indicadores y de las dimensiones, se agruparon en cada una de las perspectivas (Figura 3-3).

Figura 3-3: Relación de los indicadores primarios de la cadena de suministro del gas natural con las dimensiones de Seguridad Energética (4 A's).



Para la construcción de la Figura 3-3 se utilizó cada uno de los aspectos que abarcan las dimensiones y se realizó el análisis de si esto está incluido en el indicador, es así como: la disponibilidad cuyo aspecto principal es la geología, se relaciona con las reservas de gas natural. La accesibilidad por su parte tiene que ver con la producción y la red de gasoductos, al tratarse de medidas que se asocian con la infraestructura, la cual sólo es posible si se toman decisiones desde las instituciones para su construcción. La accesibilidad recoge todos los aspectos económicos, reuniendo así a casi a todos los indicadores (excepto a las reservas) por lo tanto, sería un aspecto impulsado por el PIB; mientras que la aceptabilidad tiene que ver con la percepción de los habitantes acerca de la industria como de la seguridad en el uso de éste, el tipo de electrodomésticos que se dispongan para el uso del energético y la idea de protección al medio ambiente.

Al aplicar la ecuación (3-1) en los valores históricos (2010-2016) de cada indicador se logra eliminar las unidades y fijarlos en una escala de 1:10. Los datos históricos y normalizados se muestran en la Tabla 3-4.

Tabla 3-4: Valores históricos y normalizados de los indicadores primarios (2010-2016).

INDICADOR	Valor Histórico							
	UNIDADES	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Reservas de gas natural	GPC	7058	6620	7030	6408	5915	5443	5321
Producción de gas natural	MPCD	3133	3020	2968	2860	2624	2400	2476
Porcentaje de utilización gasoductos	%	52%	51%	50%	56%	59%	59%	58%
Precios promedio de gas natural	\$/MBTU	8356	7370	4952	6967	8722	7099	7575
Consumo de gas natural	Mpcd	1017	988	1043	1158	1092	1038	962
Demanda promedio	Mpcd	1017	988	1042	1157	1105	1037	962
PIB	G\$ cte 2005	424599	452578	470880	493831	515528	531262	541675
Población	habitantes	45509584	46044601	46581823	47121089	47661787	48203405	49291609

INDICADOR	Valores Normalizados							
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	
Reservas de gas natural	10,0	7,7	9,9	6,6	4,1	1,6	1,0	
Producción de gas natural	10,0	8,6	8,0	6,6	3,8	1,0	1,9	
Porcentaje de utilización gasoductos	3,0	2,0	1,0	7,2	10,0	9,8	8,9	
Precios promedio de gas natural	9,1	6,8	1,0	5,8	10,0	6,1	7,3	
Consumo de gas natural	3,5	2,2	4,7	10,0	7,0	4,5	1,0	
Demanda promedio	3,5	2,2	4,7	10,0	7,6	4,5	1,0	
PIB	1,0	3,2	4,6	6,3	8,0	9,2	10,0	
Población	1,0	2,3	3,6	4,8	6,1	7,4	10,0	

Los datos muestran que el consumo es inferior con respecto a la producción, esto se debe a que en promedio el 41% de la producción de G.N es destinada para el consumo interno, los volúmenes restantes son: 46% reinyección en campos para aumentar los volúmenes recuperados de petróleo, 4.5% autoconsumo de la industria petrolera, el excedente (8.5%) está dividido entre no aprovechado, las exportaciones, y el ajuste (UPME, 2015b). En la

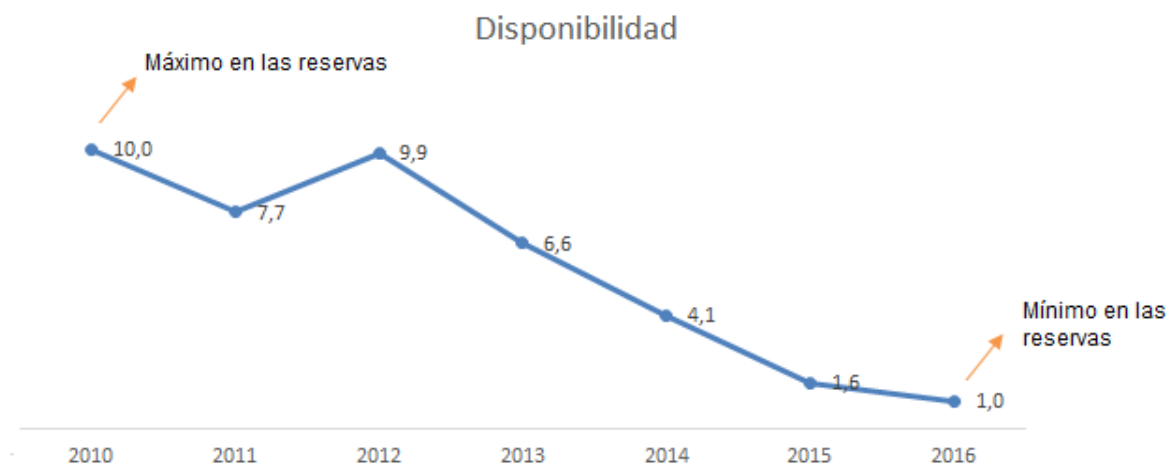
Tabla 3-5 se presentan los valores históricos de cada dimensión y también el valor ideal para cada una, el cual se calcula como el máximo valor obtenido en el histórico analizado.

Tabla 3-5: Promedio anual de cada dimensión.

Dimensión	Promedio Anual							Valor ideal (Máximo)
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	
Disponibilidad	10,0	7,7	9,9	6,6	4,1	1,6	1,0	10,0
Accesibilidad	4,7	4,6	4,5	6,7	7,2	6,7	6,9	7,2
Asequibilidad	4,5	3,9	3,9	7,3	7,5	6,1	5,7	7,5
Aceptabilidad	4,7	4,2	4,4	7,3	7,1	5,4	5,2	7,3

En la Figura 3-4 a la Figura 3-7 se grafican los valores obtenidos de cada dimensión y se señala el motivo principal de comportamientos extremos a partir de los valores de los indicadores que definen a cada una. Para la dimensión de Disponibilidad (Figura 3-4), se tuvieron valores máximos y mínimos de las reservas al inicio y final del periodo de estudio, sólo en el 2012 se adicionan reservas en el inventario, para los años restantes, se obtienen valores que van en descenso siguiendo la lógica de agotamiento del recurso. El valor promedio de la disponibilidad estuvo en 5.8.

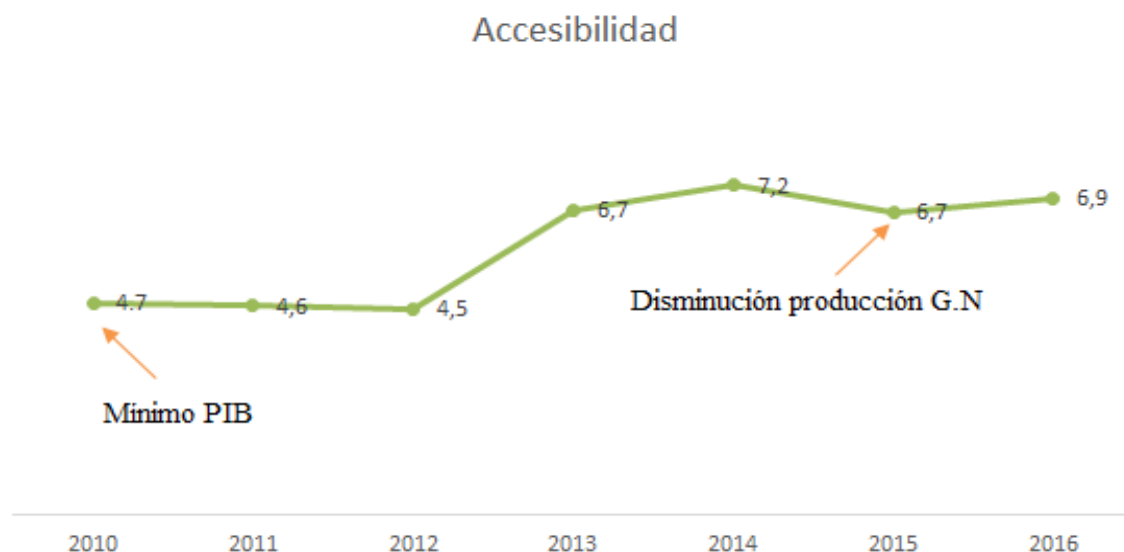
Figura 3-4: Histórico de la dimensión de Disponibilidad.



Para la Accesibilidad (Figura 3-5) durante los siete años se tuvo un promedio de 5.9, es así como entre los años 2010 a 2012 se obtuvieron valores por debajo de la media (4.5 a 4.7), esto debido a disminuciones en la producción. El mejor año para esta dimensión fue

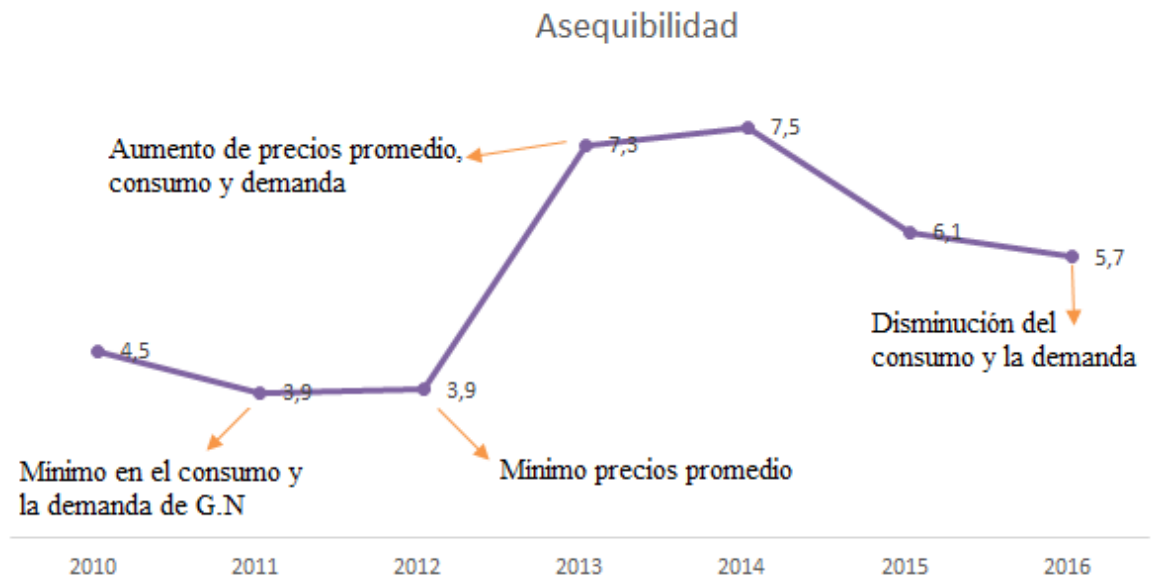
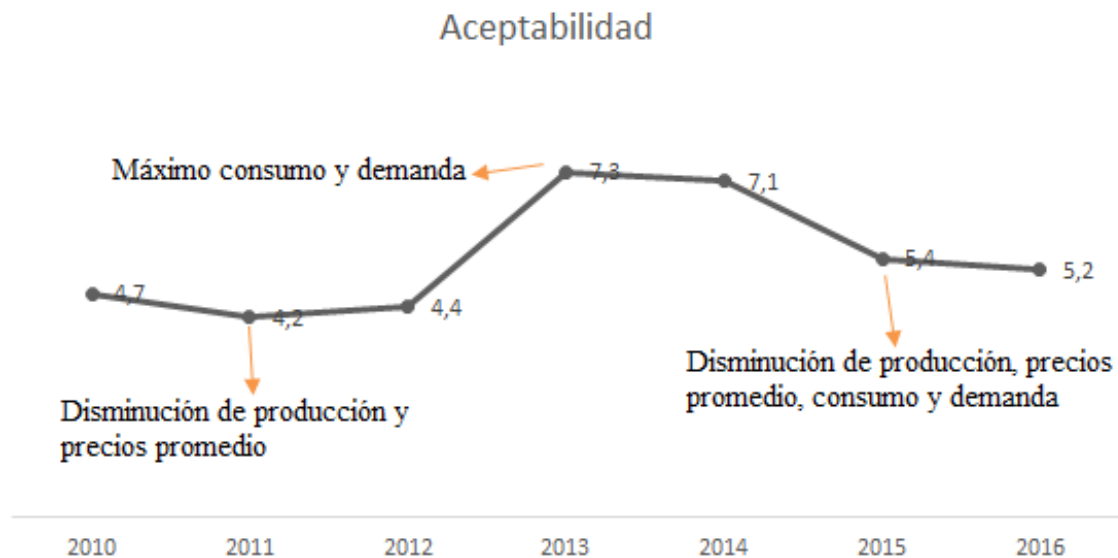
el 2014, debido a aumentos en el PIB, pero éste sigue la tendencia que ha tenido en los durante los años evaluados.

Figura 3-5: Valores normalizados históricos de la dimensión de Accesibilidad.



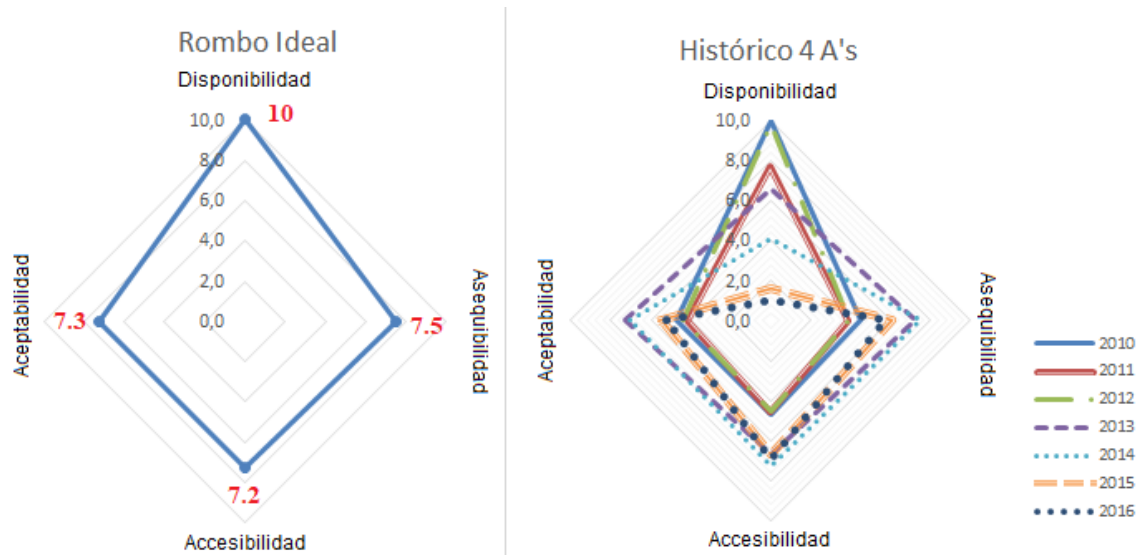
La Asequibilidad (Figura 3-6), se mantuvo en un rango de 3.9 y 7.5, el valor promedio fue de 5.5, este comportamiento se debe a la participación de todos los indicadores en esta dimensión, hay un equilibrio entre valores máximos y mínimos. La tendencia en los primeros años es a la baja, alcanzando un valor mínimo de 3.9 en el 2012 generado por disminución de los precios promedio, aunque este comportamiento no se debe considerar negativo, debido a que en el mercado una disminución en este aspecto puede promover el consumo de aquellos sectores que sean sensibles a este comportamiento. Para el 2014 se logra impulsar la dimensión hasta su valor máximo de 7.5 promovido por el PIB y los precios promedio del energético.

La Aceptabilidad (Figura 3-7) tiene un aumento repentino del 2012 al 2013, debido a que en el 2012 los precios promedios fueron bajos, lo cual pudo impulsar el consumo, pero esto sólo se vió reflejado a partir del año 2013. El promedio de este aspecto de la S.E fue de 5.5.

Figura 3-6: Asequibilidad con datos normalizados para el periodo 2010-2016.**Figura 3-7:** Datos normalizados de Aceptabilidad.

En la Figura 3-8 se hace el comparativo entre los valores reales obtenidos para cada dimensión en el periodo reportado, como también se ilustran los valores del rombo ideal. El rombo ideal se define como el máximo valor que en el histórico alguna vez fue alcanzado, lo cual tiene más sentido que un valor de 10, el cual podría plantearse como ideal sin saber si sería posible alcanzar este valor y lograr mantenerse.

Figura 3-8: Valores históricos de las dimensiones y caso ideal.



De la Figura 3-8 se infiere que el mejor año para todas las dimensiones, fue el 2013, no por tener valores máximos, sino porque hubo un equilibrio en ellas, ninguna destacó sobre otra, pero el valor mínimo fue de 6.6. Mientras que, en los demás años, hubo al menos una dimensión con valores inferiores a 0.5.

El rombo ideal muestra que el balance del sistema se logra al mantener la mayoría de las dimensiones en valores por encima de 7.0. Aunque la Disponibilidad es el aspecto con el máximo valor que puedan tener las dimensiones, se recuerda que esta dimensión hace referencia particular a las reservas; además, por la metodología, el indicador debe alcanzar un valor máximo y mínimo (al ser normalizado) para el periodo de estudio.

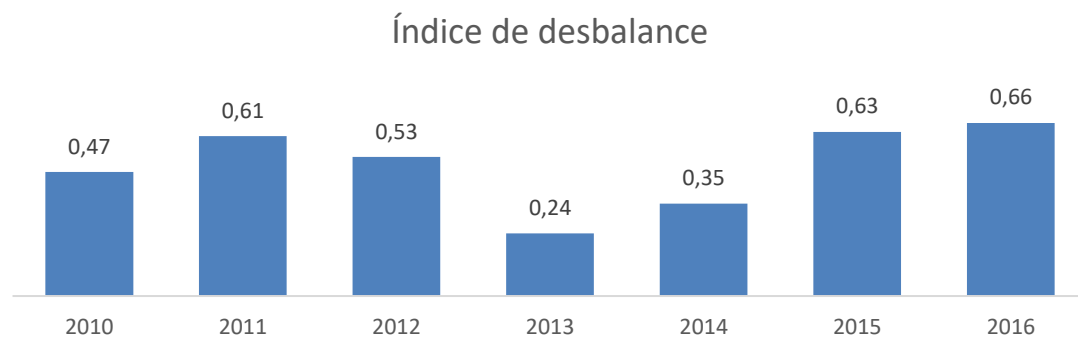
Al aplicar las ecuación (3-2) y (3-3) se obtienen los valores del área del rombo y del índice de desbalance (I.D) los cuales se muestran en la Tabla 3-6. El análisis del índice de desbalance indica que valores de 1 son para un año de desbalance en el sistema mientras que el cero denota una situación de completo balance.

Tabla 3-6: Área del rombo e índice de desbalance para el periodo 2010-2016

AÑO	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	Rombo Ideal
ÁREA ROMBO	67,2	49,8	59,9	96,9	82,5	47,7	43,4	127,3
ÍNDICE DE DESBALANCE	0,47	0,61	0,53	0,24	0,35	0,63	0,66	0,0

De los valores obtenidos tanto del área del rombo como del I.D, se puede inferir que el año más crítico fue el 2016 y el mejor año ha sido el 2013. Este último se acerca más a una situación teórica ideal principalmente por las circunstancias puntuales, una de ellas es que las dimensiones estuvieron entre 6.6 y 7.3, en cuanto a los indicadores el valor promedio del conjunto de ellos fue de 7.0, donde el consumo y la demanda alcanzaron el valor máximo de 10, y el valor promedio para los indicadores restantes es de 6.2, pero el valor mínimo alcanzado fue 4.8 calculado para el tamaño poblacional, si se analiza este valor puntualmente no es grave, dado que la población tiene tendencia a aumentar. Inversamente, el 2016 ha sido el año de mayor desbalance, en coherencia con lo presentado en la Figura 3-4 a la Figura 3-7, donde hubo una disminución de las dimensiones (excepto de la Accesibilidad), debido a que es el año de menores reservas de gas natural, además el consumo y la demanda también alcanzan sus valores mínimos, teniendo en cuenta que este año los precios promedio aumentaron. En la Figura 3-9 se presenta el comportamiento gráfico del índice de desbalance.

Figura 3-9: Índice de desbalance: Cadena de suministro del G.N en Colombia (2010-2016).



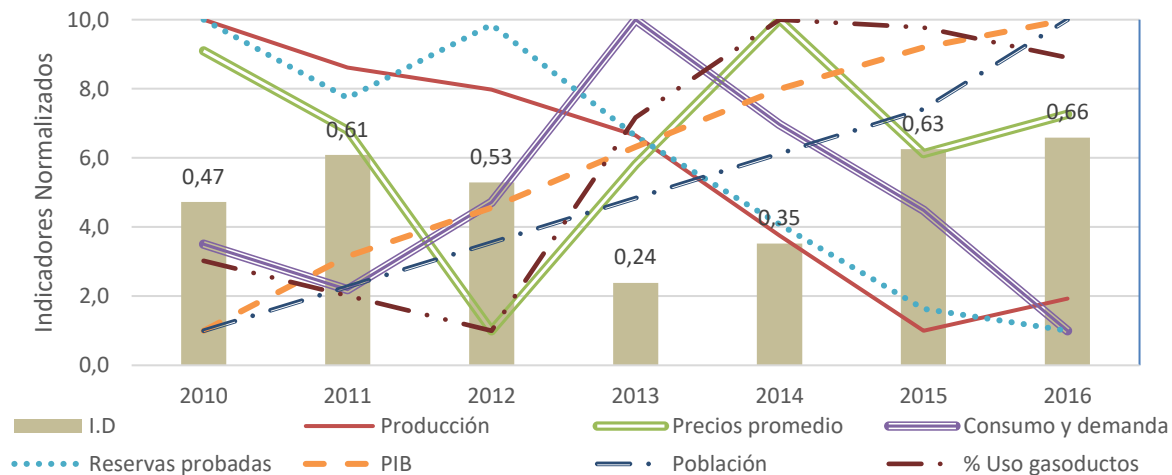
De la figura puede inferirse que la tendencia del I.D para los últimos años de estudio ha sido de aumento, apresuradamente se podría diagnosticar que el I.D seguirá en los próximos años esta misma tendencia. Sin embargo, al analizar los valores en conjunto se nota que al inicio del periodo hay una tendencia de aumento y luego de disminución, por lo cual se podría suponer que el I.D puede tener un comportamiento cíclico, pero esta afirmación sólo puede sustentarse al incluir en el análisis un periodo de estudio más amplio. Por lo que en el capítulo siguiente se hará la estimación del índice a partir de las

proyecciones de los indicadores, para poder hacer afirmaciones más justificadas del estado de la S.E en la cadena del suministro del gas natural.

3.3.2 Influencia de indicadores en el índice de desbalance

En la Figura 3-10 están los resultados de los indicadores primarios y del I.D para el periodo de estudio, los cuales resultarán útiles para analizar en este apartado de forma breve la relación directa entre los indicadores y el I.D.

Figura 3-10: Resultados de indicadores primarios (normalizados) y el I.D



De la metodología de cálculo del índice de desbalance se desprende que la relación que existe entre éste y los indicadores es inversa debido a que, generalmente, el comportamiento ascendente de un indicador favorece el balance del sistema. En la Figura 3-10 se observa que:

- Todos los indicadores han tenido un comportamiento contrario al del I.D, al menos en algún año durante el periodo de estudio.
- Para el paso del año 2010 al 2011 y del 2014 al 2015, se observa que hubo influencia por la mayor cantidad de indicadores. Puntualmente en estos intervalos de tiempo se tiende hacia el desbalance, mientras que cinco indicadores tienen comportamiento descendente: reservas, producción, precios promedio, consumo y uso de gasoductos.

- Para el intervalo 2012 a 2013, el I.D pasa de 0.53 a 0.24, es decir que alcanza su mayor estado de balance, lo cual es promovido principalmente por el consumo, seguido de los precios promedio.
- En el año 2014 la cadena de suministro se encuentra el balance, pero para el año 2015 disminuye esta calificación hasta alcanzar el valor de 0.63, generado por disminución en los precios promedio y la producción.
- El valor promedio desde el 2010 hasta el 2016 del I.D es de 0.5, lo cual indica que pese a que los años de desbalance ($I.D > 0.5$) han sido predominantes que los de balance, el sistema ha logrado un equilibrio entre ambos estados propiciado por el comportamiento variable de la mayoría de los parámetros.
- Los indicadores de PIB y la población han tenido comportamiento ascendente y se espera que ésta siga siendo la tendencia. Podría decirse entonces que pueden estar favoreciendo el balance del sistema, pero esto podría suponerse cierto bajo ciertas condiciones. Por ejemplo, si este comportamiento también es apoyado principalmente por la disponibilidad y accesibilidad del recurso.
- Por su parte, las reservas y la producción de gas natural han tenido tendencia a disminuir, es decir, un desbalance en la cadena del suministro. Esta situación podría suponerse reversible si desde las políticas internas se intenta remediar esta situación.
- El valor normalizado del uso de la red de gasoductos presenta grandes variaciones año tras año. Aunque este parámetro en algunos intervalos tiene el mismo comportamiento del I.D, al analizar los valores del indicador se observa que estuvo entre el 50% y el 59% haciéndolo un indicador estable, lo cual podría llevar a concluir que, es el de menor relevancia en este análisis particular, debido a su poco margen de variación.
- Por otro lado, el I.D parece replicar el comportamiento del consumo (y la demanda) de gas natural. Esta afirmación se debe a que ante una variación en éste, el índice actúa en el mismo sentido. Ante aumentos en el consumo generan disminuciones en el I.D y ante la disminución en el indicador se sigue una conducta de desbalance.
- En general, el índice de desbalance es sólo un valor puntual de la S.E en la cadena del suministro del G.N, por lo que se recomienda el análisis puntual del índice a partir de los factores que originan tal comportamiento.

3.3.3 Consideraciones acerca del índice de desbalance

Para el cálculo del índice de desbalance se siguió la metodología propuesta por Yao & Chang (2014). Durante el cálculo del Índice de Desbalance para el caso de estudio, surgieron algunas observaciones, las cuales se presentan a continuación:

- Es importante definir la dirección deseada de los indicadores utilizados para calcular el I.D. Por ejemplo, los precios altos del gas natural aumentan las utilidades, lo cual es deseable para los agentes inversores en la cadena productiva; mientras que, desde el segundo enfoque, los precios bajos serán bien vistos desde el lado del consumidor. Otra medición importante es el porcentaje de uso de los gasoductos, el cual podría pretenderse sea estable porque cuando el uso es muy alto se puede estar poniendo en riesgo la cobertura y si es muy bajo, se subutiliza la infraestructura. Para este parámetro se pueden definir rangos aceptables. Para otros parámetros, como las reservas y la producción, se recomienda determinar valores críticos. La definición de qué es apropiado para cada métrica dependerá del objetivo del estudio; en este caso, un aumento en todos los indicadores es más deseable, incluido el del precio, pese a la disparidad entre consumidores e inversores.
- Para la normalización de los indicadores se aplica la fórmula (3-1), para la cual se aplican valores máximos y mínimos de los indicadores. Aquellos parámetros que tengan un comportamiento histórico estable (ejemplo: uso de gasoductos está entre 50% y 59%) al ser normalizados, necesariamente se dispersan en valores entre 1 a 10, con lo cual se podría erradamente penalizar aquellos valores cercanos al valor mínimo. Se recomienda acompañar el análisis de los valores normalizados con los datos históricos, con esta práctica, aunque se perciban valores normalizados extremos, al comparar con el dato original se reconoce puntualmente lo que señala el parámetro.

La ventaja de aplicar la fórmula de normalización de Scaling (3-1) es que los valores obtenidos posteriormente para el índice de desbalance también se enmarcan en una escala fija (0:1); caso contrario a lo ocurrido cuando se usan normalizaciones que cambian el valor mínimo por la media o un valor crítico, o se utiliza la normalización de *t-student*, en todos estos casos los valores normalizados de los indicadores dejan de tener una escala común, adquieren valores tanto positivos como negativos y finalmente el I.D tiene variaciones menores y mayores a uno.

- El I.D permite resumir la evolución de la S.E a lo largo del tiempo. Adicionalmente, es flexible con la cantidad de indicadores que sean necesarios en cada dimensión. No obstante, tiene desventajas como: permite que el deterioro en una dimensión se compense con la mejora en otra, por lo que el tener en cuenta los valores puntuales sólo del índice no es posible identificar las debilidades del sistema
- Las variables que componen el índice dependen unas de otras, principalmente porque algunas dimensiones tienen parámetros en común y porque intrínsecamente están relacionadas (por ejemplo, no hay transporte de gas natural sino no hay suministro), por lo que es difícil aislar el efecto de cada una de ellas en la S.E de la cadena.
- Los indicadores tienen igual peso sobre las dimensiones y éstas a su vez sobre el I.D, se propone discutir si es necesario cambiarse esta suposición para reflejar la importancia relativa sobre el I.D de cada una de las variables.

3.4 Conclusiones

El conocimiento de los indicadores primarios permite hacer un seguimiento del estado de la cadena de suministro. Se encontró que la etapa inicial de la cadena está en estado crítico, debido a que las reservas de gas natural han tenido tendencia a disminuir, afectando principalmente la confiabilidad de tener suministro en el futuro.

Los resultados obtenidos para el índice de desbalance indican que en el caso colombiano se han logrado periodos de balance como de desbalance. Además, el análisis del conjunto de indicadores y del I.D mostró que el consumo de gas natural tiene mayor incidencia sobre el índice con respecto a los demás, por lo que su comportamiento determina el balance o desbalance de la cadena.

Para calcular las dimensiones de S.E y se usó el método de igual ponderación (pesos iguales). Sin embargo, vale la pena considerar otros métodos como el de pesos calibrados en el cual se considera la participación de cada indicador teniendo en cuenta el concepto de especialistas y el uso final para el índice.

Es necesario definir aspectos particulares importantes para cada indicador: como la dirección deseada hacia la cual debería moverse, intervalos óptimos y valores críticos. Así se evita que indicadores como el de precios promedio de gas natural debe ser interpretado

en la misma dirección de los demás, porque si bien un alto precio puede indicar que los costos unitarios están aumentando, también mostrar mayor utilidad para quienes invierten en el sector. Además, la preferencia de tener precios altos o bajos depende del lado que se interprete: menor precio para consumidor o mayor precio como productor (de acuerdo al porcentaje de ganancia).

4. Modelo de seguridad energética para la cadena de suministro del gas natural en Colombia

En el presente capítulo se propone un modelo de S.E apoyado en la Dinámica de Sistemas (D.S) para su construcción. En la primera parte se resumen los elementos principales de la D.S, posteriormente se presenta y aplica la metodología para la construcción del modelo y se analizan los resultados para la cadena del suministro del gas natural en el periodo 2015-2050.

4.1 Dinámica de sistemas

La Dinámica de Sistemas es una metodología que ha sido aplicada a diferentes sistemas energéticos, particularmente en el sector del gas natural, un ejemplo de ello es el modelo aplicado al caso de Estados Unidos para el cual se analizan diferentes políticas coherentes con los planes nacionales, a partir de las cuales se identifica el año en el cual se alcanza el máximo consumo del energético como consecuencia del incremento de precios y cuyo comportamiento no es reversible, además porque el agotamiento del recurso es innegable (Naill, 1975). En el caso del mercado de gas natural en Argentina, en los resultados del modelo se denota el déficit en la oferta generado directamente por los precios bajos, producto de la regularización del mercado, lo cual desestimuló la inversión en la exploración. Adicionalmente, la implementación de políticas tempranas (en el 2006), como la instalación de infraestructura para importación de G.L.P o desregularización del mercado, hubiera representado una mejora en el panorama de desabastecimiento (Ponzo, Dyner, Arango, & Larsen, 2011). El caso contrario se derivó para China, en el cual se reconoce la importancia de la intervención del gobierno, mediante la adopción de métodos de fijación de precios con el fin de incentivar las etapas tempranas de la industria como lo son la exploración y la explotación del recurso (Xiao, Cheng, Shen, & Wang, 2017).

Finalmente, en Colombia se aplicó un modelo que usa la dinámica de sistemas y la optimización en el cual se identifica el agotamiento temprano de las reservas disponibles y se determina que la red de gasoductos nacional puede ser una gran limitante para la entrega de la producción desde los principales campos hacia la red, por lo que debe trabajarse en los planes de expansión de gasoductos (Olaya & Dyner, 2005).

Los anteriores casos de estudio se usaron como complemento a las metodologías aplicables para evaluar la S.E (sección 2.4) y determinar que se empleará la Dinámica de Sistema como herramienta para la construcción del modelo de S.E, tal como lo relata J.W Forrester (el padre de la D.S) entre las ventajas que ofrece esta disciplina se encuentran:

- El comportamiento dinámico puede ser observado sin intervenir o entorpecer adrede el sistema real;
- Es un punto de convergencia entre la ingeniería y la administración;
- Es aplicable a diferentes tipos de sistemas (Forrester, 1989).

Si bien las anteriores pueden ser características muy generales y que también son ofrecidas por otras metodologías como, por ejemplo, la optimización. Puntualmente la D.S permite a partir del planteamiento de una hipótesis dinámica, entender los vínculos de causa-efecto de las variables que se presentan en el sistema. Además, de permitir implementar políticas y observar el comportamiento, sin tener que intervenir directamente el sistema, tal como se afirmaba con antelación.

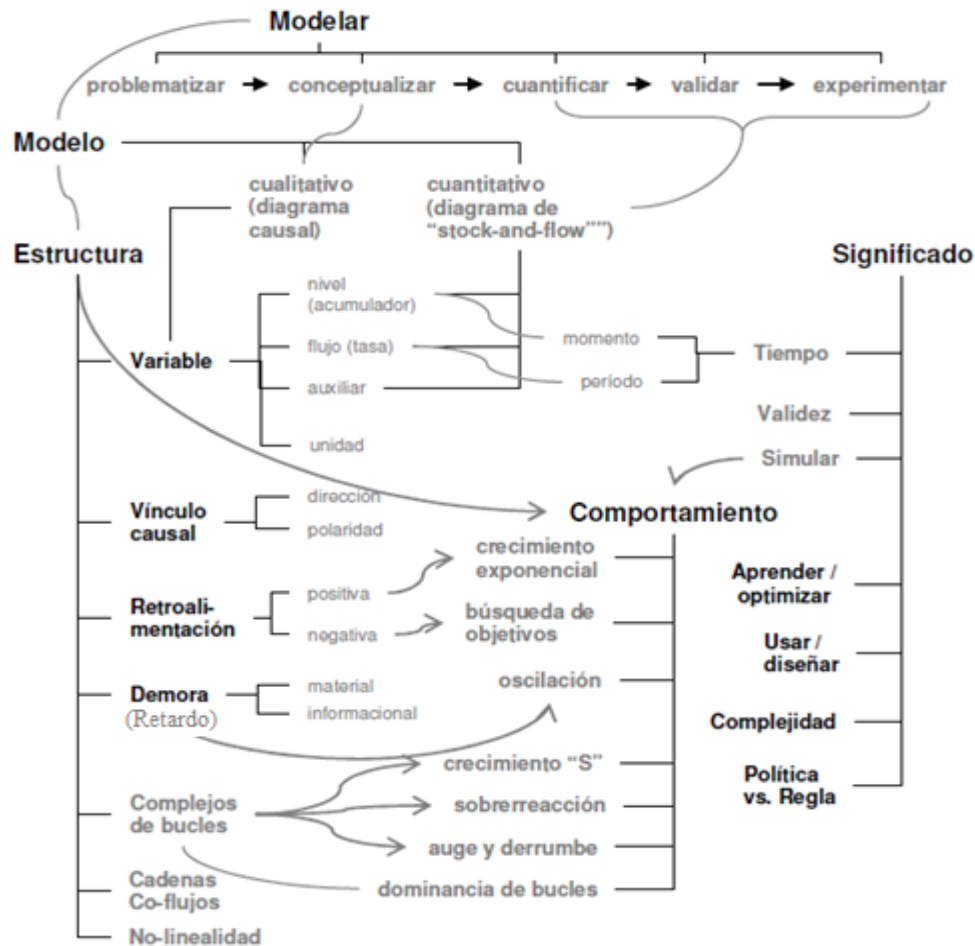
En la Figura 4-1 se resumen los conceptos generales de D:S. La notación de los vínculos en el gráfico es: líneas rectas negras representan la descomposición conceptual, las flechas grises significan “causa” y las líneas simples en gris denotan una relación del tipo “tiene que ver con”. Así, por ejemplo: Para modelar hay que plantear un modelo para el cual debe captarse la estructura la cual es la causa del comportamiento del sistema.

Las variables que se definen en la estructura del modelo (Figura 4-1) son:

- Nivel: Actúa como variable acumuladora; a partir de la cantidad de elementos se determina el estado actual de una variable.
- Flujo: representado como una tasa o variación. Puede ser calculado como la comparación o diferencia de dos estados o niveles.

- Auxiliares: Contienen información, sirven para aplicar matemáticamente una decisión en el sistema o explicar un resultado (por ejemplo: la diferencia entre dos variables).
- Unidad de medida: Permite definir la magnitud a través de un estándar o ley.

Figura 4-1: Conceptos generales de Dinámica de Sistemas.

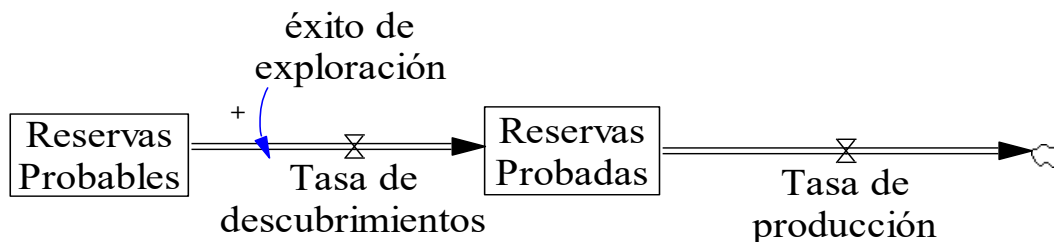


Fuente: Tomado de Schaffernicht (2008, p. IV)

Un ejemplo de las variables que definen la estructura del modelo se muestra en la Figura 4-2, el cual es un modelo de reservas y producción, en éste los niveles son: reservas probables y reservas probadas, los cuales son modificables usando flujos, por ejemplo: las reservas probadas se aumentan sólo a través de la tasa de descubrimientos y se disminuyen por la tasa de producción; mientras que las reservas probables sólo disminuyen por medio de las tasas de descubrimientos. Otro elemento del modelo es la

variable auxiliar llamada éxito de exploración, la cual está relacionada directamente con la tasa de descubrimientos. Finalmente, hay factores que no son relevantes para el objetivo del modelo y cuya convención es una nube, y en este caso aparece al final de la tasa de producción, la cual significa que las reservas se obtienen de las probadas y no importa la salida del flujo, o por lo menos no es relevante para el modelo planteado.

Figura 4-2: Ejemplo de variables de flujo, nivel y auxiliares.



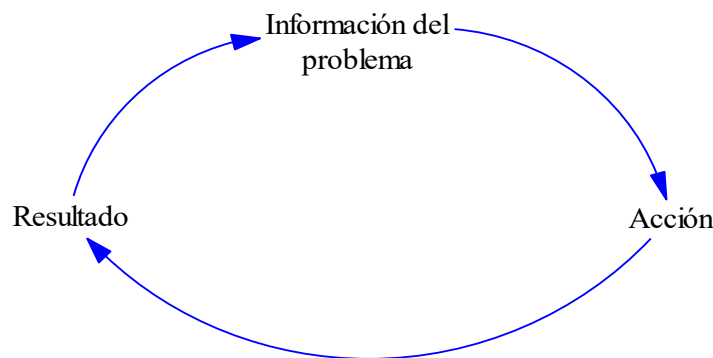
Los elementos de la Figura 4-1 de dinámica de sistemas son utilizados en dos tipos de modelos: cuantitativos y cualitativos, con los primeros se busca conceptualizar el problema, por ejemplo a través del planteamiento de un diagrama causal que permite identificar ciclos de realimentación y predecir la estructura desde el comportamiento cualitativo; y los segundos conservan los razonamientos del anterior, pero se expresa en niveles, flujos o auxiliares (Figura 4-2), lo cual es útil porque se llega a modelar relaciones no lineales, cuantificar comportamientos y experimentar en el sistema.

Desde el lado del significado, hacer un modelo de D.S permite aprender y adquirir experiencia del sistema, identificar bucles, extraer lo más relevante del sistema e identificar si se cumple con el objetivo planteado. La D.S también modela sistemas complejos, los cuales resultan serlo no sólo porque reflejan la relación compleja entre los diferentes elementos del sistema, sino porque los resultados pueden ser contraintuitivos y su análisis puede llevar a identificar elementos que no habían sido considerados, como la retroalimentación en el sistema.

Una de las ventajas de modelar está en identificar comportamientos y aplicar modificaciones sin alterar el sistema. Para Schaffernicht (2008) las modificaciones pueden

ser de dos tipos: las implícitas, en las cuales los procesos importantes arrojan información para dar paso a una decisión y las explícitas que son decisiones que se aplican a través de acciones y generan nueva información. Esto último es simplificado por Forrester (1992, p. 44) como: “un problema es percibido, se propone una acción y se espera un resultado”. En la Figura 4-3 se muestra el bucle básico que existe en un proceso de toma de decisiones, en el cual la retroalimentación es continua, porque las acciones generan cambios en el sistema, cuyo resultado puede ser o no el esperado y en consecuencia se genera nueva información que conlleva a tomar nuevamente una decisión, o lo comúnmente llamado implementación de políticas..

Figura 4-3: Estructura básica en la cual existen todas las decisiones



Fuente: Traducido de Forrester (1992, p. 44)

4.2 Metodología

Las fases de modelamiento en D.S se han estandarizado en cinco pasos y son resumidos por Sterman (2000, Capítulo 3), el cual enfatiza en que modelar es un proceso de retroalimentación no una secuencia lineal de pasos. De acuerdo con esto, los lineamientos son:

4.2.1 Definir el problema

El propósito de este primer paso es tener clara la definición del problema, lo cual es clave para la resolución de éste. La articulación se hace al definir:

- Selección del tema o más específicamente del problema.
- Variables y conceptos claves que se deben considerar.

- Horizonte de tiempo: aplica tanto para la información histórica como para las proyecciones que se vayan a realizar.
- Definición de un problema dinámico: ¿Cuál ha sido y cuál debe ser el comportamiento de variables y conceptos claves?

4.2.2 Elaborar un modelo conceptual o una hipótesis dinámica

Una vez definido el problema se pasa a la etapa de análisis cualitativo, la cual permite tener una primera aproximación del problema:

- Crear una hipótesis inicial: se da a partir de la definición de variables y de establecer las relaciones causales entre ellas, lo cual debe dar una explicación y las fuentes del problema a tratar.
- Enfocarse en lo endógeno: Lo cual se logra al captar la estructura del sistema y las reglas en las interacciones. Aunque las variables exógenas pueden incluirse, se recomienda que haya un mínimo de éstas en el modelo.
- Crear Mapas: La hipótesis inicial toma forma de un diagrama causal. Existen una gran variedad de herramientas válidas para plasmar los límites del modelo y su estructura causal.

4.2.3 Formular un modelo de simulación

En esta parte del proceso se da el paso a un modelo formal, con variables de flujo y de nivel, las cuales están representadas internamente por ecuaciones diferenciales. Los pasos son:

- Especificación de la estructura y reglas de decisión.
- Estimación de parámetros, relaciones de comportamiento y condiciones iniciales.
- Pruebas de consistencia para identificar fallas en la formulación y mejorar el entendimiento del problema.

4.2.4 Probar el modelo

Ésta no es una etapa puntual, sino que es una etapa iterativa que comienza cuando se escriben las ecuaciones del modelo y permite adquirir confianza en él. Las actividades para probar el modelo incluyen:

- Comparación con los modos de referencia: El modelo debe ser significativo en el mundo real y replicar el comportamiento del problema simulado.
- Prueba de la robustez en condiciones extremas: Esto debe ser posible tanto en las variables de entrada como en las políticas aplicadas.
- Análisis de sensibilidad: Evaluada contemplando la incertidumbre en los supuestos (parámetros y estructurales).

Algunas de las pruebas de validación que se aplican al caso de estudio son las propuestas por Sterman (2000, Capítulo 21); tal como lo propone el autor, al aplicar las pruebas se intenta mantener una actitud reflexiva. En el Anexo D se exponen los resultados obtenidos de la indagación sobre el modelo propuesto.

4.2.5 Implementar políticas, modelar y evaluar

Esta etapa consiste en elaborar escenarios de cambio y simular para obtener resultados de acuerdo con la alternativa aplicada. Las actividades son:

- Especificar escenarios y comparar sus consecuencias dinámicas.
- Diseñar políticas: Estrategias, reglas o decisiones nuevas que se puedan implementar en el sistema real y cómo se pueden implementar en el modelo.
- Analizar ¿Qué pasa si...?: Evaluar los efectos de implementar políticas.
- Hacer análisis de sensibilidad: Determinar qué tan robustas son las recomendaciones que surgen a partir de las políticas bajo diversos escenarios y las incertidumbres.
- Evaluar la interacción de las políticas: Registrar si se presenta interacción entre las políticas aplicadas y cuáles son las sinergias o las respuestas que le dan contrapeso.

En complemento a lo anterior, Pidd (1999) elabora una guía de modelamiento en la que incluye los siguientes consejos:

- Hacer que el sistema complejo esté formado por sistemas simples.
- Los datos no solucionan el problema sólo sirven para validar; en otras palabras, “todos los modelos están mal, hay que enfocarse en la estructura y el proceso, no en los resultados” (Sterman, 2002). Si bien esta afirmación es debatible por el hecho que muchos modelos se utilizan para apoyar la toma de decisiones, también expresa que el obtener resultados confiables parte de la correcta estructuración del problema a solucionar, modelar es un proceso de continua evaluación.

- Hacer uso de diferentes figuras literarias (símil, analogías y metáforas), para entender el sistema que se va a modelar.
- En la práctica funciona más pensar y analizar que la construcción del modelo, y de este último, lo importante es plantear la estructura.

4.3 Formulación del modelo

4.3.1 Definición del problema

El problema que se va a abordar es la evaluación de la S.E del gas natural en Colombia, considerando la interrelación entre las variables que definen la S.E y su posición en la cadena de suministro. La oportunidad para el tema planteado está en que una de las amenazas a la seguridad del suministro en la cadena del gas natural está principalmente en la declinación de la producción nacional, la cual intenta ser aliviada con las importaciones.

Las importaciones del suministro en este estudio no se consideran ni positivas ni negativas, sólo que en las suposiciones se da prioridad a la producción interna porque como se ha mencionado, el mercado del gas natural está abastecido en el corto plazo, pero hay vulnerabilidad por la disponibilidad del recurso.

La escala de tiempo que se va a considerar es de largo plazo, abordada con indicadores que ejerzan influencia en ese horizonte de tiempo. Los indicadores de S.E están definidos en el periodo 2010 – 2015 y el modelo busca proyectar su evolución hasta el 2050.

Los conceptos claves son:

- Tasa de descubrimientos, la cual afecta directamente las reservas de gas natural con las que cuenta el país. Las inversiones que se han hecho para promover los descubrimientos han sido escasas y se espera siga igual, porque se está priorizando la infraestructura para la importación. Sin embargo, tampoco hay garantías de aumentar los inventarios del energético si se aumenta la inversión en exploración.
- Tasa de producción: La cual genera variación en las reservas probadas. Ha ido en aumento y se espera siga la tendencia.

- Capacidad instalada de transporte: Es una limitante para la tasa de producción. En el sistema existen zonas aisladas y el transporte se ha priorizado para la zona centro y costera del país. Recientemente se han hecho algunas inversiones de expansión sobre tramos específicos
- Demanda (cubierta e insatisfecha): También determinan la producción; aunque la demanda se encuentra al final de la cadena, ejerce presión desde el inicio del sistema. La tendencia ha sido de aumento de la demanda, dadas las políticas de promover el uso del energético. La demanda se modelará como una variable exógena como se explicará más adelante.
- Costos unitarios: Asociados al costo de explorar, producir y transportar el gas natural y al retorno que tiene el sector, el cual es definitivo para hacer inversiones y a su vez variar las reservas probadas y la infraestructura.
- Oferta o suministro: Está condicionada por el transporte, el suministro, importaciones y la demanda. La proyección de esta variable es de aumento puesto que se requiere para satisfacer la demanda.

4.3.2 Hipótesis dinámica

La formulación del comportamiento del sistema se presenta en subsistemas para hacer el planteamiento más sencillo a través de las diferentes etapas. Se utilizan diagramas causales donde las flechas indican relaciones de causalidad en las cuales la variable de partida se considera como causa y la variable consecuencia es el punto de llegada de la flecha. Sobre la flecha se indica si la relación entre ambas es el mismo sentido (+) o sentido contrario (-); es decir, un cambio en la variable causa genera una variación igual o contraria en la variable consecuencia. Como parte de la formulación del modelo (sección 4.3.3) está definir los niveles y flujos del sistema, sin embargo, en la definición de los diagramas causales se usará esta convención para definir las variables que sean de este tipo.

Otra de las notaciones utilizadas es el uso de texto en color negro para indicar las variables principales y el de color gris encerrado entre comillas diferencian variables que se modelan en otro subsistema (se consideran endógenas al sistema principal pero exógenas al subsistema) y el formato de cursiva subrayado se usa para variables exógenas a todo el sistema.

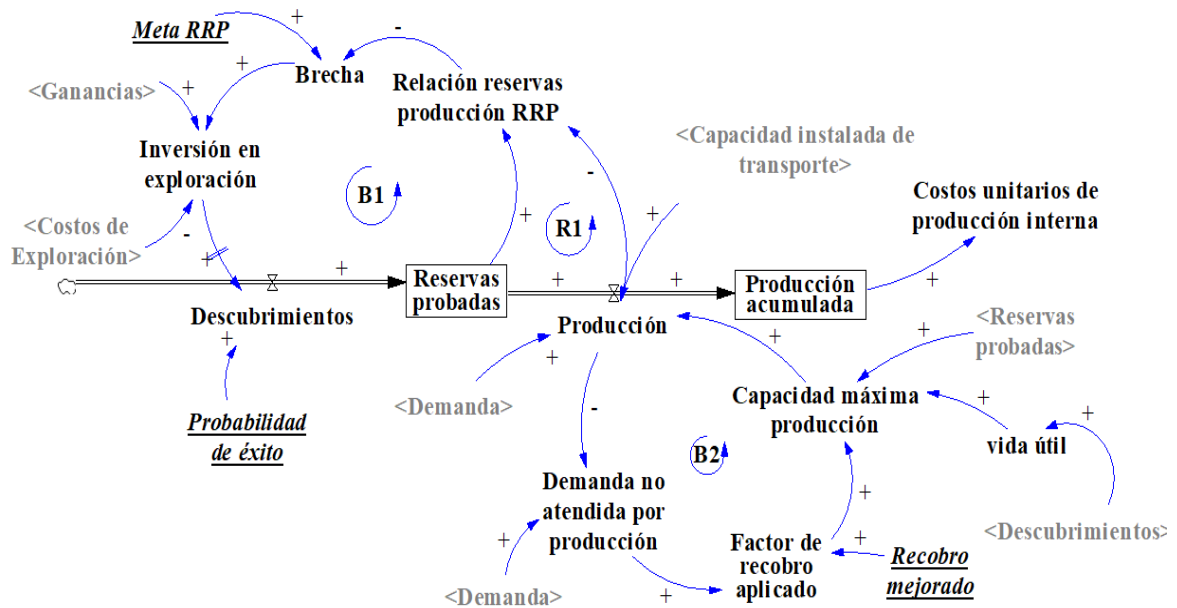
Luego de hacer el recuento de los signos totales en un ciclo, se encuentran dos tipos de retroalimentación: positiva o de refuerzo cuando el balance de los signos es positivo y retroalimentación negativa o de balance, cuando el cálculo de los signos es negativo. La notación para este tipo de ciclos se hace con la letra B (Balance) o R (Refuerzo) para señalar la existencia de ciclos de causalidad, el cual es señalado en el centro con su respectivo sentido (dirección). Otro elemento de los diagramas causales son los retardos, los cuales se denotan con dos líneas transversales a las flechas, indicando que el efecto de una variable sobre otra no es inmediato.

A continuación, se presentan los cinco diagramas causales que constituyen el comportamiento del sistema.

- **Subsistema de reservas y producción**

Un primer modelo es aquel que presenta la etapa explotación y exploración de reservas de gas natural para satisfacer la demanda (Figura 4-4). En este primer subsistema se identifican tres ciclos: el primero es de balance (B1), en el cual las reservas probadas y la tasa de producción actual definen la relación reservas producción (RRP), la cual es el número de años en que las reservas probadas pueden sostener la tasa de producción actual. Surge entonces una brecha como el comparativo entre RRP con una meta, la cual es el objetivo de la política. Mientras mayor sea la brecha y mayores sean las ganancias de la industria, mayor es la inversión en exploración. En este primer ciclo hay un retardo entre la inversión en exploración y los descubrimientos, dado que el efecto de la exploración no es inmediato, este proceso tarda un tiempo hasta poder asegurar la existencia de nuevos descubrimientos.

El segundo ciclo es de refuerzo (R1), el cual podría analizarse como un aumento en la demanda y con suficiente capacidad de transporte, se genera un aumento en la tasa de producción y un posterior aumento en la brecha reservas-producción. El segundo ciclo de balance (B2) indica que a mayor demanda y capacidad de transporte aumenta la producción; si la capacidad de producción es inferior a la demanda, aumenta la demanda no atendida y esto es una señal para aumentar el factor de recobro y la capacidad máxima de producción, por medio de actividades como el recobro mejorado (Enhanced Oil Recovery, EOR) que permiten aumentar el porcentaje de extracción de recursos.

Figura 4-4: Diagrama causal Reservas-Producción.

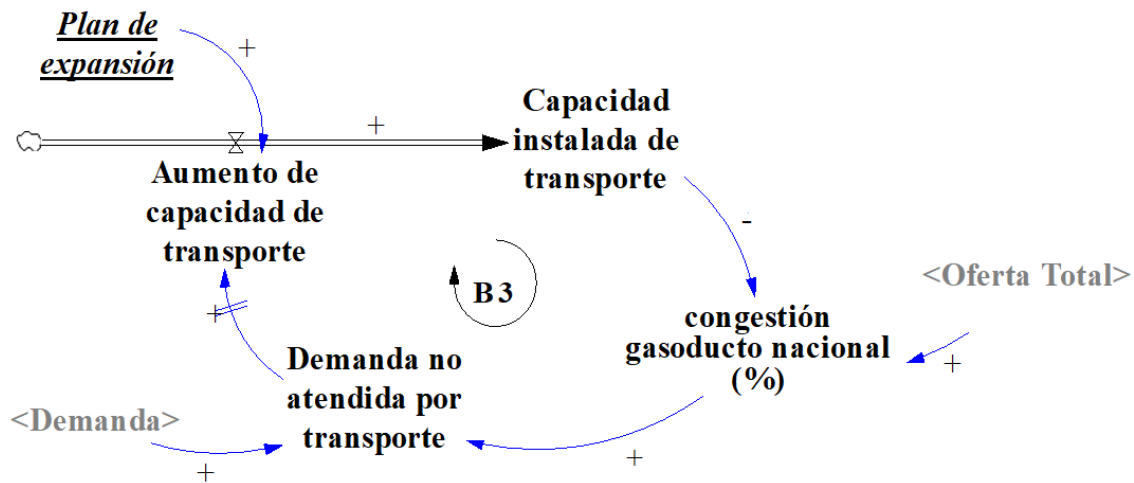
Desde el punto de vista de la S.E la producción está limitada por la capacidad de transporte y depende de la demanda. Si la producción es insuficiente para satisfacer la demanda, se puede aumentar la producción por medio de recobrado mejorado, pero eso aumenta los costos unitarios en producción (el agotamiento de recursos aumenta el costo unitario de producción) y el efecto final es la disminución en los descubrimientos (con retardo) al reducirse las inversiones en exploración, pues los mayores costos disminuyen la rentabilidad de la industria en general. Cada descubrimiento que se haga aumenta la vida útil de los proyectos y a su vez a la capacidad máxima de producción, la cual es determinada por las reservas y el factor de recobro.

▪ Subsistema de transporte

Una representación del transporte de G.N a través de la red de gasoductos se presenta en la Figura 4-5: Diagrama causal del transporte de gas natural. Se tiene una capacidad inicial y se hacen planes de expansión de acuerdo con los requerimientos de la demanda, la cual puede llegar a no atenderse cuando la capacidad del gasoducto no es suficiente para recibir el volumen de G.N producido. El diagrama causal del transporte nacional obedece a un ciclo de balance, el cual puede interpretarse como el aumento en la capacidad del gasoducto tiene el mismo efecto sobre la congestión del gasoducto y la producción (Figura

4-4) , finalmente esto conlleva a una disminución de la demanda no atendida cuando ha habido limitación en el transporte.

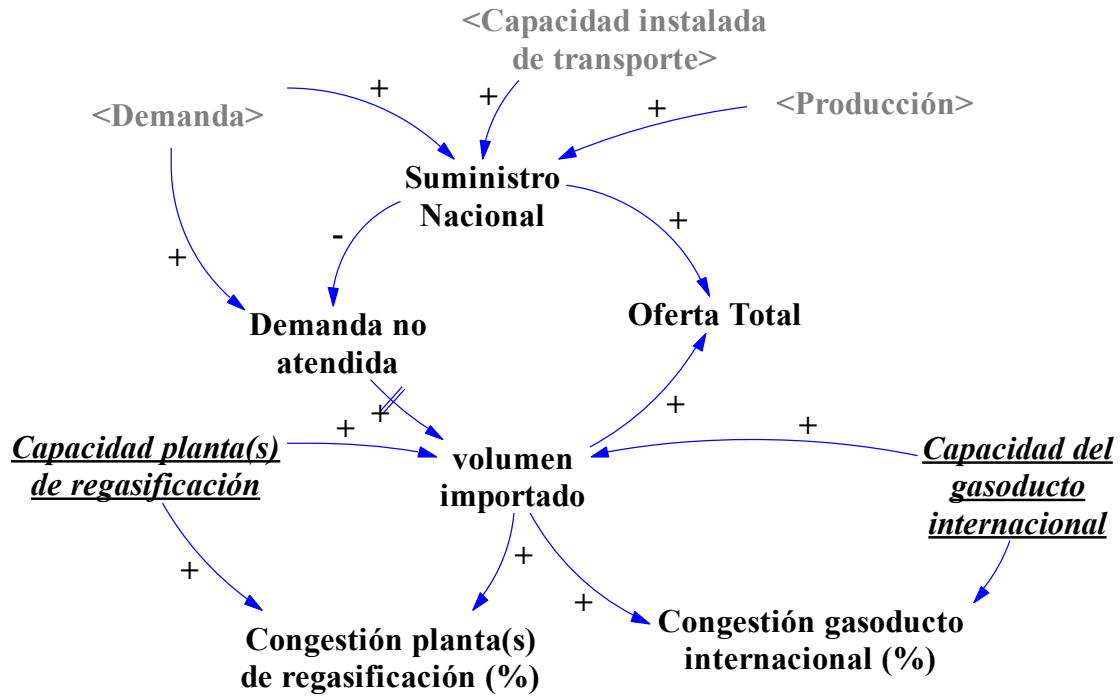
Figura 4-5: Diagrama causal del transporte de gas natural.



En el diagrama causal del transporte aparece un retardo para el aumento de la capacidad de transporte; éste último sólo es posible dentro de un proyecto de construcción e instalación de infraestructura, por lo que ante una señal de desabastecimiento a causa del gasoducto sólo es posible gestionar en el corto plazo el aumento del porcentaje de uso (congestión) y no intervenir inmediatamente la capacidad de transporte.

▪ Subsistema oferta total de gas natural

Este módulo relaciona la producción, la demanda y el transporte. En la Figura 4-6 se muestra que el suministro de gas natural depende de la capacidad de transporte, la demanda y tasa de producción. Si la cantidad demandada supera la oferta interna, es necesario importar. La demanda impulsa el comportamiento del sistema, lo cual se ve reflejado en la aparición de la variable en todos los subsistemas.

Figura 4-6: Diagrama causal de la oferta de gas natural.

La variable de desempeño en el diagrama de la oferta de G.N es la demanda no atendida, la cual se origina ya sea porque la capacidad de transporte es insuficiente o porque no ha habido suficiente producción que abastezca la demanda, por lo que se debe recurrir a importaciones a través del gasoducto que conecta a Colombia con Venezuela o mediante el uso de la planta de regasificación (La de Cartagena está operativa desde noviembre del 2017 y la del Pacífico se planea entre a funcionar a partir del 2023).

Si bien en el diagrama causal de la oferta total no se define un ciclo, es relevante debido a que en él están definidos algunos de los indicadores primarios de la cadena de suministro.

▪ Subsistema de costos de producción

En la ecuación (4-1) se muestra que la construcción de un ciclo de retroalimentación en el módulo de costos no es posible, dado que el costo unitario (c.u) del gas natural se define a partir de la suma de gastos de toda la cadena productiva (exploración, producción y transporte). También se tiene en cuenta el retorno esperado y el factor de producción definido como la relación de la producción inicial con respecto a la acumulada.

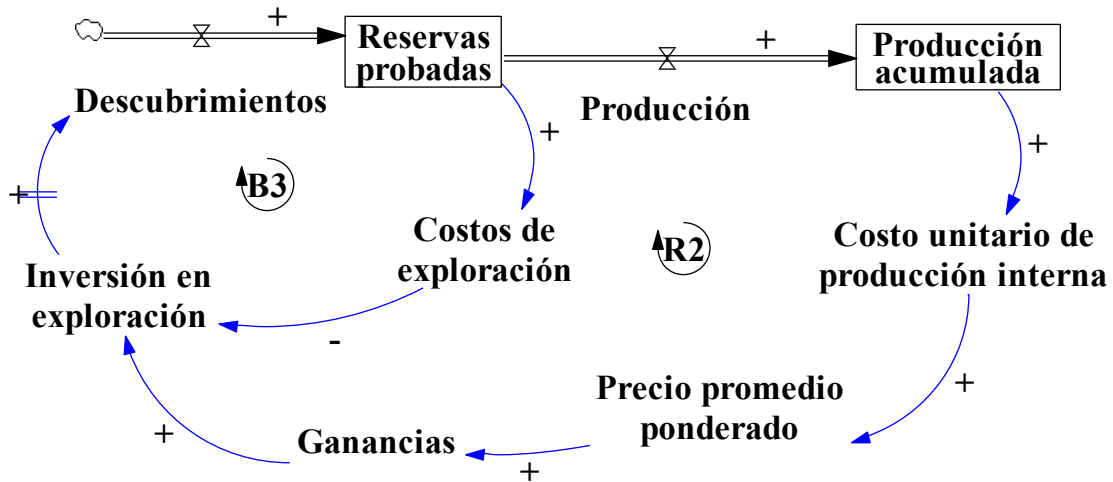
$$c.u_{interno} = (c.prom.exp + c.prom.pdn * factor pdn + c.prom.tte) * Retorno \quad (4-1)$$

$$c.u_{importación} = [f(indice NBP) + c.prom.tte + c.regasificación] * Retorno \quad (4-2)$$

Los costos unitarios del volumen importado (ecuación(4-2). se calculan teniendo en cuenta los datos históricos y las proyecciones del índice National Balancing Point (NBP) que rige para el Reino Unido; esta suposición se debe a que los vendedores potenciales del gas natural comprimido, entre ellos Trinidad y Tobago, tienen como principal mercado Asia y Europa (Promigas, 2017), al usar el índice NBP se está teniendo en cuenta el costo de oportunidad de los proveedores. Por otra parte, desde la desregularización (CREG, 2013), el precio interno ha comenzado a acercarse al precio Spot del Henry Hub (mercado de G.N en Lousiana). Por tanto, el precio de venta final en Colombia se calcula como el promedio ponderado del volumen del energético (dependiendo el origen) y los costos unitarios (c.u) asociados al mismo, tal como se muestra en la ecuación (4-3).

$$\text{Precio final de venta} = \frac{(c.u * pdn)_{interno} + (c.u * volumen)_{importación}}{volumen oferta total} \quad (4-3)$$

En forma general, en el módulo de costos ante el aumento de cualquier variable, se genera un aumento en los precios del combustible. Además, si se enlaza los cálculos de los costos con el diagrama de producción-reservas (Figura 4-7), se evidencia que las ganancias influyen en las inversiones lo cual favorece en consecuencia los descubrimientos, las reservas, y la producción. La producción acumulada es un determinante de los costos unitarios, del precio final y de las ganancias, creando así un de refuerzo (R2) ciclo entre dos subsistemas, lo cual ayuda a entender como cada una de las partes del sistema sigue estando relacionada a través de los diferentes subsistemas definidos. Por otro lado, también hay un ciclo de balance (B3) en el cual los descubrimientos aumentan las reservas, pero esto genera posteriores dificultades para nuevos hallazgos por tratarse de recursos limitados por lo que aumentan los costos en exploración y esto disminuye los incentivos para destinar fondos a la exploración, reduciendo las posibilidades de nuevos hallazgos.

Figura 4-7: Diagrama causal de exploración y costos.

▪ Subsistema de demanda

La demanda se considera una variable exógena porque aunque se utilizaron modelos simples de los siete sectores de consumo en los cuales se tiene en cuenta la tasa de crecimiento de cada uno, se utilizó la herramienta “Analysis Variables” del software PowerSim para ajustar los parámetros y lograr acoplar los resultados del módulo con las proyecciones de demanda del 2015-2029 que propone la UPME (2015e). Para los años posteriores (2030-2050), se utilizan los valores puntuales que proporciona el documento de referencia, debido a que para este tiempo se propone ajustar la demanda al Plan Energético Nacional (PEN). Si bien la demanda ha sido simulada como las demás etapas de la cadena, en este estudio se considera exógena debido a que los parámetros se ajustan para obtener resultados ajustados a lo propuesto por otro estudio. La explicación para usar una formulación exógena de la demanda es que el tiempo es una limitante para proponer proyecciones propias para modelo y el planteamiento de la proyección de la demanda no está dentro de los alcances de este trabajo. Sin embargo, se reconoce que esto resulta siendo una restricción para el modelo, debido a que en esta representación de la demanda los parámetros y la formulación en general no tienen libertad de hacer un pronóstico libre o predecir algún evento que no haya sido programado adrede. Pero una ventaja de tener un módulo que calcule los valores de la demanda es que si se va a aplicar por ejemplo una política que genere cambios en el consumo de un sector particular, ésta puede ser aplicada y los resultados obtenidos podrán ser medidos en esta etapa como en las demás de la cadena de suministro.

En la ecuación (4-4) se indica que la demanda está representada por los diferentes sectores de consumo: residencial, comercial, industrial, petroquímico, petrolero, transporte y termoeléctrico. Estos afectan la demanda de forma positiva o, dicho de otra forma, la influencia es en el mismo sentido. En la ecuación (4-5) se evidencia que existen dos tipos de demanda: la no regulada está definida por la mayoría de los sectores de consumo y es elástica debido a que reacciona ante los cambios del precio del energético en sentido inverso, es decir, el precio influencia los patrones de consumo de la demanda no regulada; mientras que la demanda regulada es de elasticidad unitaria (UPME, 2015e).

$$Demanda_{regulada \text{ o } No \text{ regulada}} = \sum_{i=1}^7 Consumo \text{ sector}_i \quad (4-4)$$

$$Demanda = (Elasticidad * Demanda)_{regulada} + (Elasticidad * Demanda)_{No \text{ regulada}} \quad (4-5)$$

Para el sector petroquímico se hace la suposición que, aunque hace parte de la demanda regulada, es modelado como una variable constante la cual no ha sufrido grandes variaciones en los últimos años y se espera un comportamiento parecido de acuerdo con las proyecciones de demanda.

La demanda es la variable vinculada a toda la cadena del suministro por estar presente en la mayoría de los subsistemas y aunque no aparece explícitamente en el diagrama de costos, ejerce influencia directa sobre la producción nacional. Otro aspecto importante en el planteamiento de la demanda es la aparición de dos variables relevantes: El PIB y la población, las cuales fueron denominadas variables impulsadoras (Sección 3.2) o variables de desarrollo de la demanda. El PIB como factor económico ayuda a el consumo, la calidad de vida de los habitantes (la conexión o acceso a un tipo de suministro energético es una de ellas) y también al aumento de la población, esta última determina la cantidad de consumidores y los clientes potenciales del sistema.

Los valores de consumo de cada sector y los valores iniciales de los niveles se especifican en Anexo C, Tabla C- 3. Para el 2018 se espera que las térmicas atiendan la demanda de 300 MW por la interconexión eléctrica con Centroamérica y en el 2026 se pronostica baja hidrología por lo que la necesidad de generación eléctrica por medio de las termoeléctricas

aumentará (UPME, 2015e). Estas proyecciones están sujetas a incertidumbre, pero se toman como escenario de referencia. Adicionalmente, el sector petroquímico mantiene una demanda constante durante todo el periodo de estudio, debido a que no es un sector con gran proyección en el futuro.

En el intervalo de tiempo de 2030 a 2050, el módulo de demanda no utiliza ecuaciones para el cálculo, sino que se tomaron valores puntuales del pronóstico de la UPME, el cual a partir del 2030 fue desarrollado utilizando el Plan Energético Nacional, bajo las siguientes suposiciones:

- Mayor consumo de G.N y energía eléctrica (reemplazo de energéticos tradicionales).
- Disminución de gases de efecto invernadero.
- Mayor eficiencia en los procesos industriales.
- Implementación de vehículos que usan electricidad, G.N y G.L.P como energético.
- Fin del conflicto armado.

El pronóstico de este escenario llamado tecnológico, pronostica los valores de demanda que se muestran en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1: Valores pronosticados para la demanda en el periodo 2030-2050.

Año	2030	2035	2040	2045	2050
Demanda (Gpc/año)	319	366	418	478	549

Fuente: UPME (2015e).

▪ Variables exógenas

La principal variable de este tipo es la demanda por estar ajustada a un pronóstico de la literatura. También el módulo de reservas y producción es influenciado por tres variables exógenas: la primera es la probabilidad de éxito de un nuevo hallazgo de reservas, la segunda es el factor de recobro mejorado, y la tercera es la meta RRP. La probabilidad de éxito de la exploración se considera que no puede ser alterada por el sistema, ya que depende directamente de la geología. El recobro mejorado no es una variable que puede sufrir muchas alteraciones, porque a pesar de existir técnicas avanzadas de recobro mejorado para aumentar el porcentaje de extracción, las propiedades de la roca y el fluido resultan siendo una limitante. En cuanto a la meta de reservas/producción la cual indica

cuántos años de abastecimiento están planeados, depende principalmente de los planes energéticos del país, al igual que las capacidades de regasificación e importación del energético.

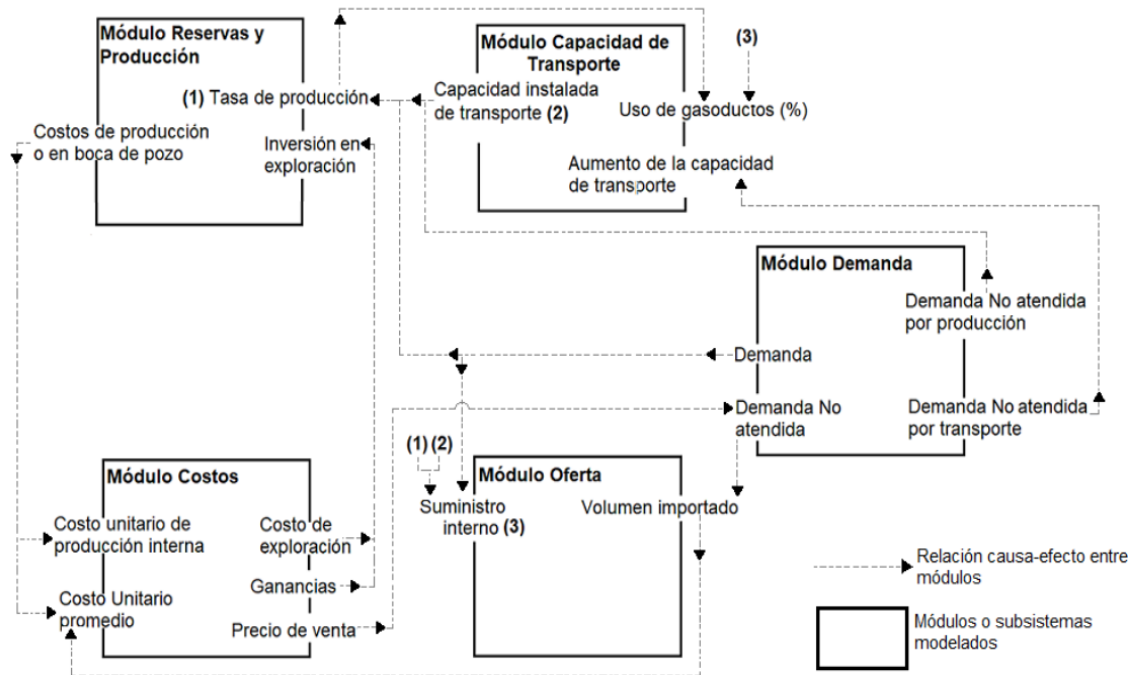
En este modelo el plan de expansión de los gasoductos se define como una variable exógena, aunque puede ser limitada por la planeación e inversión que requiere. Una suposición similar se hace con otras variables cuyo comportamiento es complejo y no se modela en este ejercicio como: los costos promedio de transporte, los costos promedio de exploración, el retorno esperado para cada agente.

Los diagramas causales han servido para tener un planteamiento inicial del sistema. En la siguiente sección se mostrará la relación entre los diferentes módulos y las consideraciones tenidas en cuenta para la construcción del modelo.

4.3.3 Formulación del modelo

En la Figura 4-8 se encuentra la estructura general del modelo. Las variables que relacionan los subsistemas del modelo se muestran a través de flechas punteadas. Aunque en la Figura 4-8 se omiten la mayoría de las variables de cada módulo, se muestra las relaciones directas e indirectas entre los módulos y la complejidad del sistema. También se presentan las etapas de interés de la cadena de suministro, la cual puede verse por etapas de inicio a fin y a su vez las principales retroalimentaciones.

Se define el periodo de simulación entre 2015 y 2050, logrando proyectar principalmente los indicadores en el largo plazo. Además, se usa como herramienta el software PowerSim, el cual se configura para con un paso de tiempo de 1 año y el tipo de integración es Euler de primer orden. En el modelo se usaron unidades estándar, es decir que todas las variables serán convertidas a una misma magnitud, para el volumen de G.N se usa giga pie cúbicos ($1 \text{ Gpc} = 1 \cdot 10^9 \text{ pie cúbicos}$), la unidad de tiempo es año y la moneda es el dólar (US\$).

Figura 4-8: Módulos que componen el modelo de la cadena de suministro.

▪ Módulo Reservas y Producción

Los descubrimientos son planteados como el único medio de adición de reservas de gas natural al sistema, si bien el origen de dichos descubrimientos sería las reservas probables (R.P), éstas no fueron modeladas y se suponen lo suficientemente grandes. Además, los descubrimientos se controlan a través de las inversiones que se hacen en el sector, las cuales son limitadas y así se tiene una estimación conservadora de los descubrimientos. Las reservas probadas (ecuación (4-6)) son una variable tipo nivel: la adición de inventario se hace por nuevos descubrimientos (ecuación (4-7)) y la disminución de volúmenes se debe a la tasa de producción (ecuación (4-9)). Esta última supone una restricción, en la cual las reservas deben ser siempre mayores o iguales a cero. Los valores iniciales de las reservas probadas son 4361 Gpc (Promigas, 2016).

La tasa de descubrimientos se supone en 2% de éxito, mientras que las inversiones representan sólo el 15% de las utilidades y que el costo de explorar es función del factor de reservas (probadas/inicial). Hay un retardo de 4.5 años entre las inversiones y los descubrimientos (Chyong Chi et al., 2009, p. 342). El balance de unidades para esta variable se muestra en la ecuación (4-8).

En la ecuación (4-9) se plantea que la producción debe ser positiva, y es el valor mínimo entre la capacidad máxima de producción, la capacidad de transporte y la demanda. Los valores iniciales de la producción acumulada son 876 Gpc (Promigas, 2016). La tasa de producción se calcula en Gpc/año, la obtención de las unidades se muestra en la ecuación (4-10).

La capacidad máxima de producción hace referencia a las limitaciones geológicas y tecnológicas representadas en el factor de recobro y la vida útil del proyecto. Esta última es de aproximadamente 20 años de extracción del recurso. El factor de recobro para Colombia es 19%, mientras el promedio de otros países es del 35%, por lo que éste último se supone como el valor máximo alcanzado cuando se aplican tecnologías que mejoren la explotación del recurso (Maya et al., 2010).

La brecha del factor de reservas/producción (RRP) real con el “ideal” se usa como parámetro de decisión en las decisiones de inversión en exploración. Se plantea como meta mínima de 15 años de duración de las reservas. El parámetro de diferencia o brecha entre lo real e ideal sirve como señal de alerta para comenzar a ejecutar recursos en pro de nuevos hallazgos.

$$\text{Reservas probadas}_t - R. P_{t-1} = \frac{d(\text{descubrimientos})}{dt} - \frac{d(\text{producción})}{dt} \geq 0 \quad (4-6)$$

$$\frac{d(\text{descubrimientos})}{dt} = \frac{\text{probabilidad de éxito} * (\text{inversión en exploración})_{t-4.5}}{\text{costo de explorar}} \quad (4-7)$$

$$\frac{d(\text{descubrimientos})}{dt}: \quad \frac{\text{Gpc}}{\text{año}} [=] \frac{\text{US\$}/\text{año}}{\text{US\$}/\text{Gpc}} \quad (4-8)$$

$$\frac{d(\text{producción})}{dt} = \text{Máx}\{0; \text{Min}\{\text{Capacidad máx. pdn}; \text{Capacidad transporte}; \text{Demanda}\}\} \quad (4-9)$$

$$\frac{d(\text{producción})}{dt}: \quad \frac{\text{Gpc}}{\text{año}} [=] \text{Máx}\{0 \frac{\text{Gpc}}{\text{año}}; \text{Min}\left\{\frac{\text{Gpc}}{\text{año}}; \frac{\text{Gpc}}{\text{año}}; \frac{\text{Gpc}}{\text{año}}\right\}\} \quad (4-10)$$

▪ **Módulo Capacidad de transporte**

El subsistema de gasoductos recibe una señal por parte de la demanda que no pudo atenderse cuando la capacidad del gasoducto es insuficiente para transportar el volumen de G.N disponible. Se asume un retardo de 1 año entre la señal de demanda no atendida y el aumento de capacidades. Si bien existe un plan de expansión, éste no se puede implementar repentinamente, el modelo limita la ampliación anual a máximo 10% de la capacidad de los tramos. La capacidad inicial de Sistema Nacional de Transporte (SNT) es de 1747 Mpcd, la cual se obtiene de la suma de volumen transportable tanto de la Costa Caribe (738 Mpcd) como del interior del país (1009 Mpcd).

▪ **Módulo de oferta**

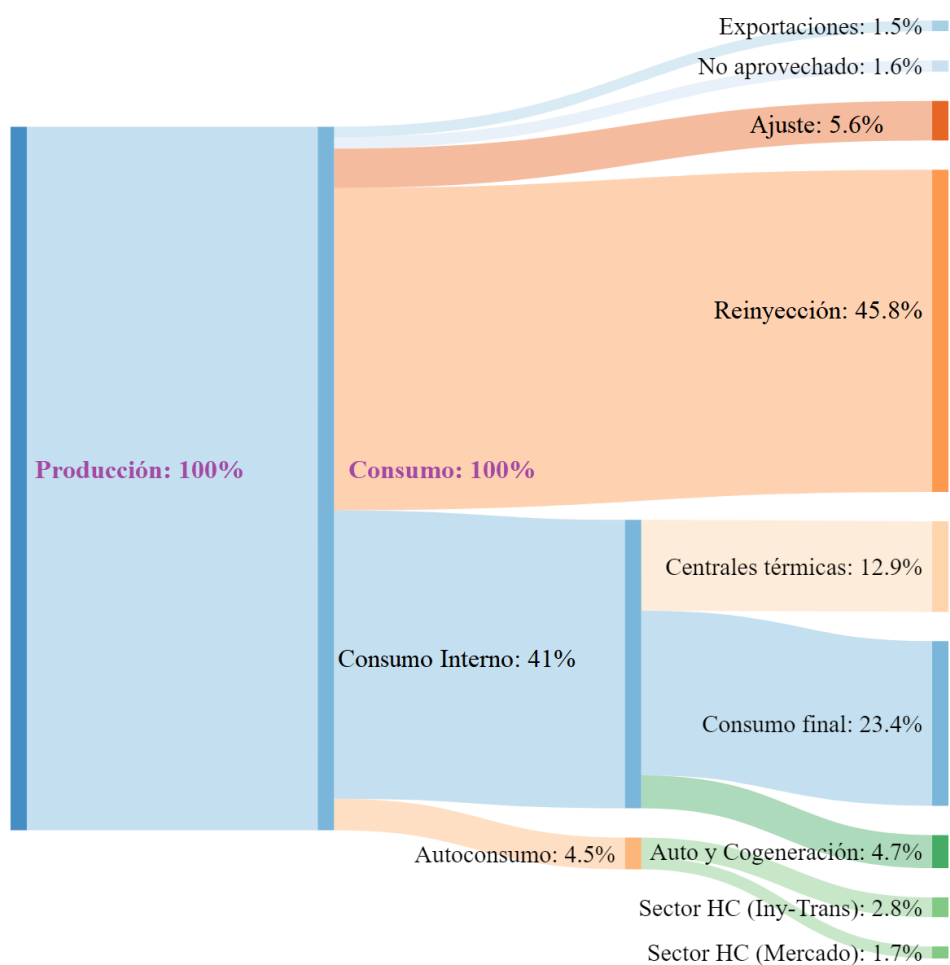
La oferta interna es determinada básicamente por el mínimo entre la capacidad de producción, la demanda y la capacidad de transporte. La producción de G.N entregada al SNT equivale al 42% de la producción. Tal como se muestra en la Figura 4-9, en el balance energético del gas natural se consume el 100% de lo producido, pero la mayor parte del volumen se utiliza en reinyección en los campos petroleros.

Otro componente importante en la oferta de G:N es que, aunque la producción interna ha tenido prioridad, la importación comenzará a hacerse relevante con la instalación de dos plantas de regasificación: la de Cartagena, disponible desde finales de 2017 con una capacidad de 400 Mpcd y la del Pacífico que entrará a procesar 220 Mpcd de G.N a partir del 2023 (Promigas, 2017). Adicionalmente se tiene una conexión con Venezuela, el gasoducto tiene una capacidad total de transporte máxima de 480 Mpcd.

▪ **Módulo de costos**

El objetivo de este módulo es el cálculo de los costos asociados al gas natural en Colombia y el precio final de venta. Los costos unitarios de importación tienen en cuenta la indexación de los costos del energético en el mercado mundial (índice NBP) y los gastos de regasificación. Mientras que los costos de producción interna se acercan al precio spot Henry-Hub. Como se mencionó anteriormente el precio de venta final hace un balance entre ambos precios, buscando sea equitativo, evitando que sea principalmente la región del Caribe quien asuma el total de los costos de importación (por la conexión del gasoducto internacional y la ubicación de la planta regasificadora).

Figura 4-9: Balance energético del G.N en Colombia.



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de UPME (2015b)

Una de las suposiciones que se hacen para el cálculo del precio promedio de venta es tener en cuenta el retorno de la inversión de todas las partes de la cadena, el cual se supone constante, de acuerdo con la información obtenida de Promigas (2017), el cual indica que el promedio de utilidades de las empresas distribuidoras y transportadoras entre 2012 y 2016 fue del 25%.

Con el fin de hacer del modelo de la cadena de suministro del gas natural en Colombia una herramienta replicable, en el Anexo C se presentan las ecuaciones y datos utilizados. Esto permite que el modelo sea evaluado y sometido a correcciones lógicas. Esto con el fin de construir una herramienta en la cual se tenga confianza y así para apoyar decisiones y

posibilitar futuros análisis y estudios que puedan asociarse a la evaluación de la seguridad energética y trabajos similares. El modelo es sometido entonces a la valoración del lector, bajo la premisa de que todos los modelos están mal y éste no escapa a las limitaciones del modelador.

4.3.4 Pruebas al modelo

Las pruebas que se realizaron para adquirir confianza en el modelo fueron:

- Adecuación del límite.
- Condiciones extremas.
- Consistencia dimensional.
- Estimación de parámetros.
- Error de integración

Las dos primeras pruebas serán tratadas en esta sección, las demás se presentan y discuten en el Anexo D.

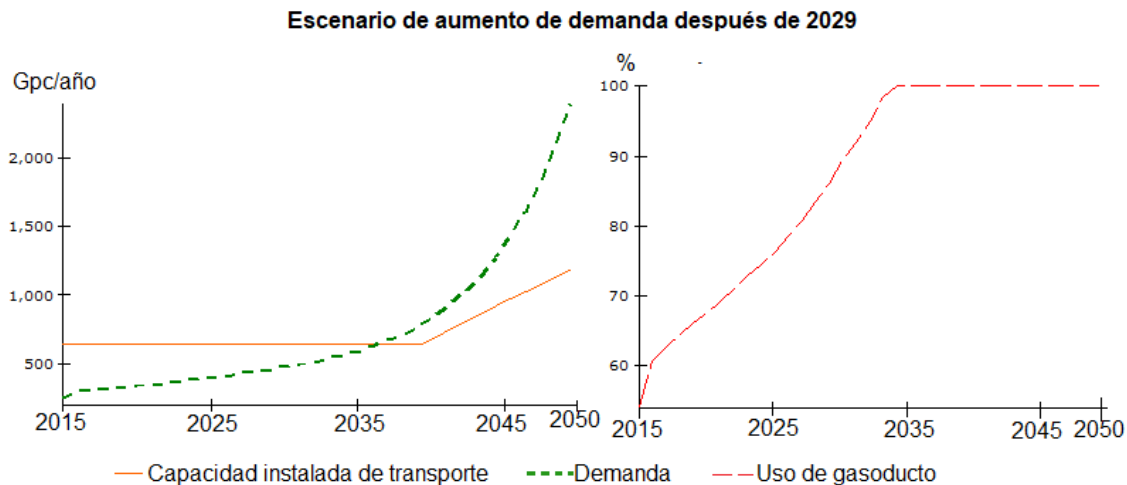
- **Adecuación del límite**

La primera prueba que se le hace al modelo es responder a la pregunta ¿Cuál es el propósito del modelo? Se propone un modelo para evaluar la S.E utilizando indicadores que servirán para valorar el estado de la cadena de suministro del G.N en todas sus etapas. La estructura del modelo fue planteada teniendo cuidado de incluir los indicadores primarios de la cadena, con esto se logra reflejar la complejidad del sistema estudiado.

- **Condiciones extremas**

La capacidad de transporte permanece casi constante durante el periodo de evaluación debido a que la demanda no exige grandes inversiones en este sector, por lo tanto, para ganar confianza en el módulo de transporte se supuso un aumento significativo de la demanda en general después del año 2030. Como se observa en la Figura 4-10, la reacción no es inmediata, porque el sistema tiene un retardo de un año y además la expansión del gasoducto no es tan acelerada como la de la demanda porque la instalación de infraestructura requiere de planificación e inversión.

Figura 4-10: Resultados del módulo de transporte ante un aumento no pronosticado de demanda.

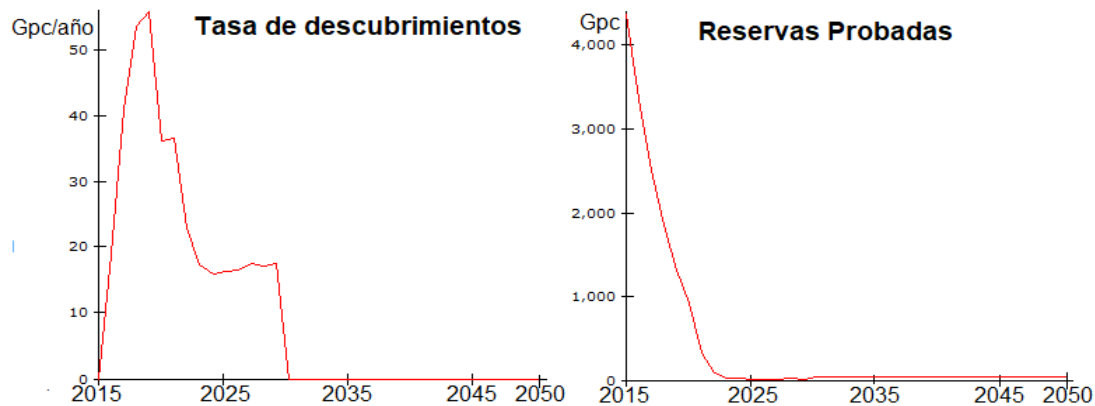


4.3.5 Resultados

Como se ha mencionado en secciones anteriores, el modelo ha sido construido utilizando indicadores que sirvan para evaluar la S.E. A continuación, se discute el estado de las dimensiones de la S.E en base a los resultados obtenidos del modelo para los indicadores, principalmente los primarios.

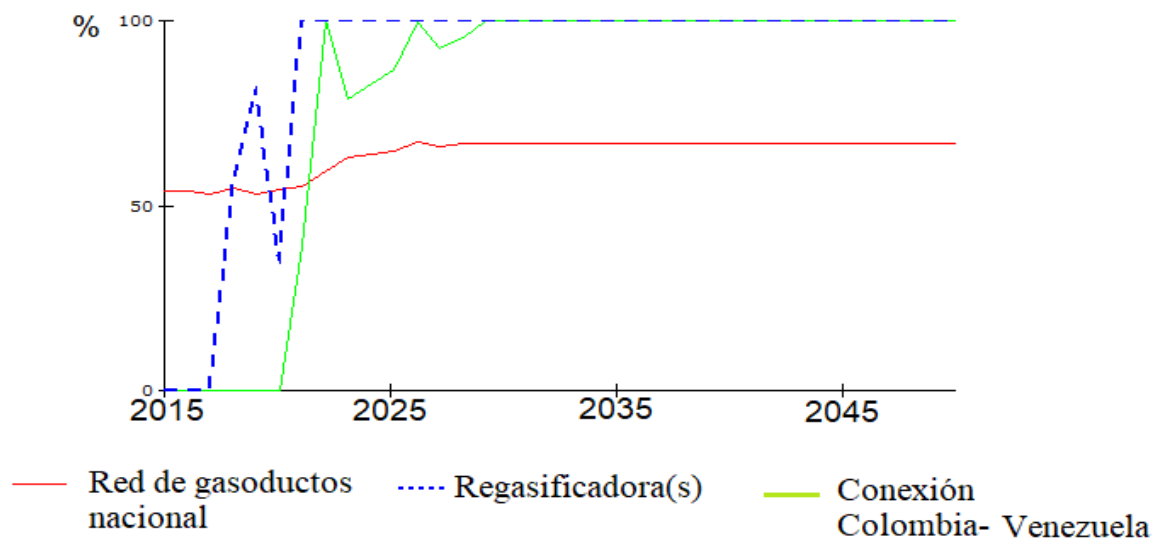
▪ Disponibilidad

Esta dimensión se relaciona con las reservas de gas natural y comenzará a ser crítica a partir del año 2023 cuando haya un agotamiento casi total del recurso (ver Figura 4-11), porque a pesar de haber hallazgos entre 2015 y 2029, estos no serán significativos. Lo que ocurrirá entonces, es que la oferta de G.N en Colombia ya no contará con la participación de este proceso interno, sino que comenzará a depender completamente de la importación y como se ha comentado en otros apartados, esto hace vulnerable al sistema debido a la incertidumbre en la oferta del energético en el mercado internacional y al aumento de la demanda.

Figura 4-11: Indicadores de disponibilidad de gas natural.

▪ Accesibilidad

Desde la perspectiva del uso de gasoductos como un indicador que ayuda a definir a la accesibilidad, se puede observar en la Figura 4-12 que el uso de gasoducto ha ido incrementando, sin llegar a su máxima capacidad; lo cual es positivo porque es posible aumentar los volúmenes del suministro sin que la infraestructura sea una limitación. No obstante, en el año 2030 se observa la disminución en el porcentaje de uso como efecto de la proyección de la demanda en este año.

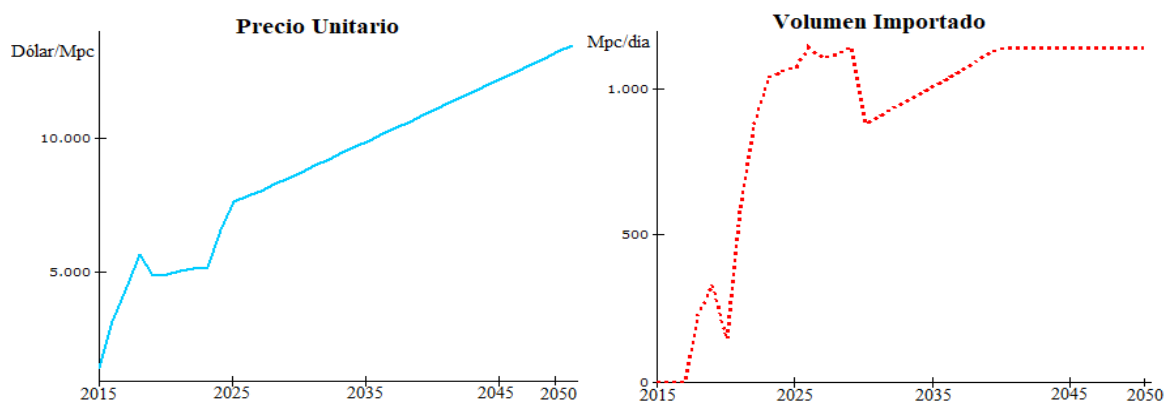
Figura 4-12: Congestión de infraestructura de transporte 2015-2050.

Aunque el comportamiento de la demanda es de aumento, se observa en la gráfica que sólo se logra utilizar un 10% adicional a los valores iniciales de la red nacional. Básicamente se puede inferir que la cobertura del G.N ha sido apoyada por la instalación de infraestructura que permite la interconexión de nuevos consumidores, y de acuerdo con los resultados de la capacidad de transporte ha sido posible la implementación de 200 Mpcd los cuales están incluidos en el plan de expansión, el cual incluye entre otros, la ampliación de tramos e infraestructura de importación y de conexión del S.N.T con las plantas regasificadoras. En la gráfica se muestra que en el 2023 comienzan a operar las dos plantas regasificadoras y aumentan su uso al igual que el gasoducto internacional hasta su máxima capacidad debido a la ausencia del suministro interno.

▪ Asequibilidad

Esta perspectiva relacionada con factores económicos tiene influencia de todos los indicadores primarios. Como ya se mencionó las reservas y la producción tienden a desmejorar el estado del sistema, por otro lado, la infraestructura instalada permite distribuir el energético sin importar cuál sea su origen. El precio del G.N también define a la asequibilidad y como se observa en la Figura 4-13, la tendencia del precio unitario es de aumento, especialmente a partir del 2021 cuando los volúmenes de importación comienzan a igualar y consecuentemente a superar la producción interna. En el futuro podría pensarse en buscar diferentes proveedores o en negociar contratos que permitan disminuir el precio de compra del G.N.

Figura 4-13: Resultado de indicadores de la asequibilidad



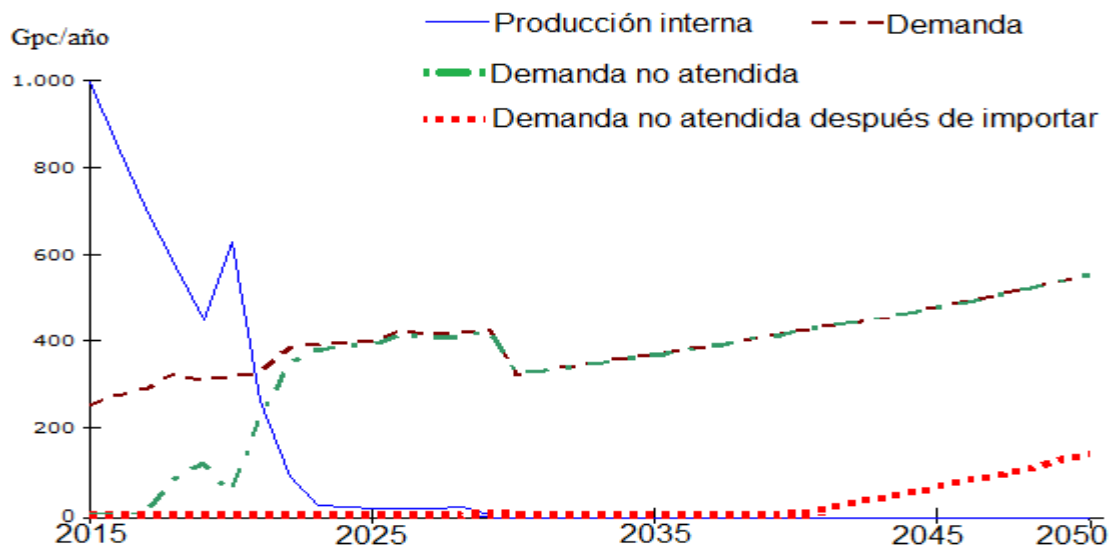
Para el periodo 2019 a 2022, se observa que el precio unitario permanece casi constante pese a tener una tendencia en los primeros años de aumento, esto se debe a que para este intervalo la producción interna es superior a la importación, por lo que el precio unitario refleja el comportamiento del índice del cual tiene mayor influencia, es decir, el precio spot Henry Hub, el cual de acuerdo con los pronósticos será casi estable entre 2700 y 3000 US\$/Mpc.

▪ Aceptabilidad

La población define los indicadores de consumo y de demanda. Básicamente se puede decir que siempre que la demanda sea abastecida, la perspectiva de aceptabilidad puede estar en una condición favorable. En la Figura 4-14 se observa que la producción será insuficiente en un mediano plazo para abastecer la demanda. Sin embargo, será suplida por la importación, lo cual beneficia la perspectiva social respecto al sistema.

Del año 2019 al 2020 se registra un aumento en la tasa de producción. Ante la demanda no atendida la reacción es implementar la técnica EOR, la cual incrementa en 161 Gpc/año la tasa de producción. Pero a pesar de hacer uso de esta tecnología, las reservas probadas son 1344 Gpc, por lo que la tasa de extracción es insostenible debido a los descubrimientos nulos entonces la depleción del recurso en el corto plazo será inevitable.

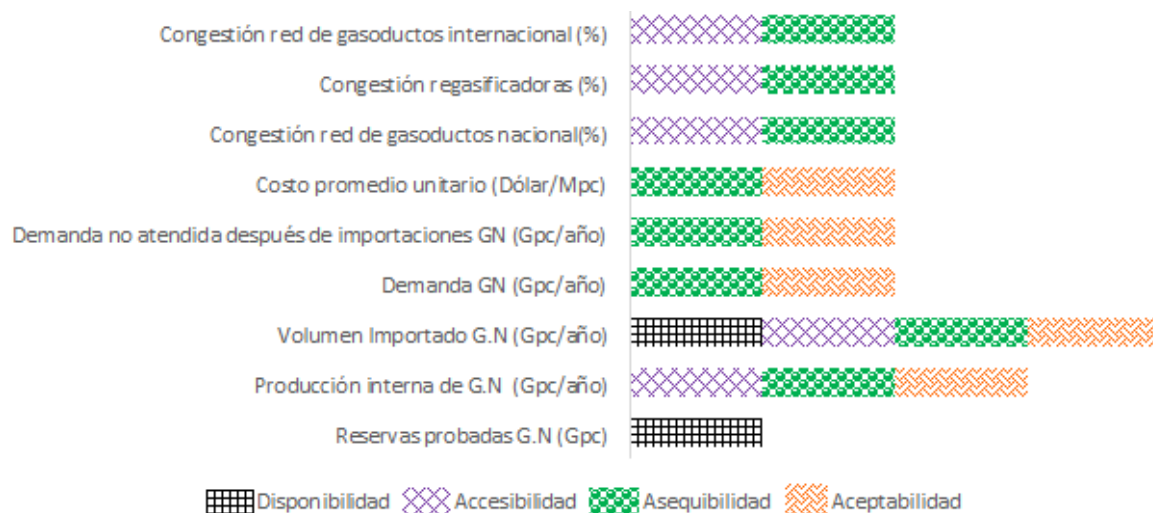
Figura 4-14: Indicadores para definir aspectos de Aceptabilidad.



4.3.6 Índice de Desbalance (Pronóstico)

Los resultados obtenidos del modelo permiten hacer el cálculo del índice de desbalance el cual fue obtenido en el capítulo anterior utilizando datos históricos. Los indicadores y la dimensión a la cual pertenece cada uno se muestran en la Figura 4-15. En este caso tanto para las dimensiones como para el cálculo del I.D se incorporaron los indicadores: utilización de infraestructura, relacionada con volúmenes de importación y la demanda no atendida después de importaciones. Las suposiciones hechas incluyen: el sentido de la demanda no atendida es inverso al utilizado para los demás indicadores porque el interés está en reducir esta métrica, el volumen importado se incluyó en todas las dimensiones, bajo el supuesto que son nuevas reservas en el sistema (Disponibilidad) e influye en las demás perspectivas (al igual que la producción interna) porque ante aumentos de la demanda se hace necesario la adquisición de suministro de origen externo.

Figura 4-15: Clasificación de los indicadores utilizados para el pronóstico del I.D



Al utilizar la metodología de la sección 3.1.2, se obtuvieron los pronósticos tanto para las cuatro dimensiones como para el I.D, lo cual se presenta en la Figura 4-16 y Figura 4-17. Las dimensiones presentan un comportamiento crítico en los primeros años, esto se debe a que el uso de la estructura para importación es bajo y el suministro interno es decreciente. Una vez el sistema encuentra apoyo en las importaciones, hay mejoría en los diferentes aspectos. Sin embargo, la disponibilidad siempre es la dimensión más amenazada y

permanece durante prolongado tiempo cercano o por debajo del valor medio. Esto se debe a que la disponibilidad depende del suministro interno que es decreciente. A partir del 2041, ante el aumento creciente de la demanda, el suministro externo sería insuficiente para el abastecimiento y se iniciaría la degradación de las dimensiones de Asequibilidad y Aceptabilidad.

Figura 4-16: Dimensiones de S.E (2015-2050)

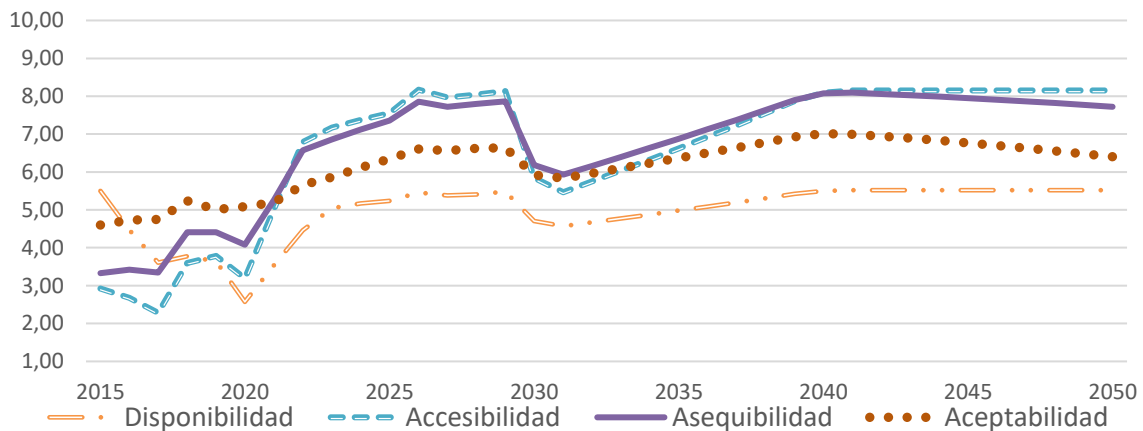
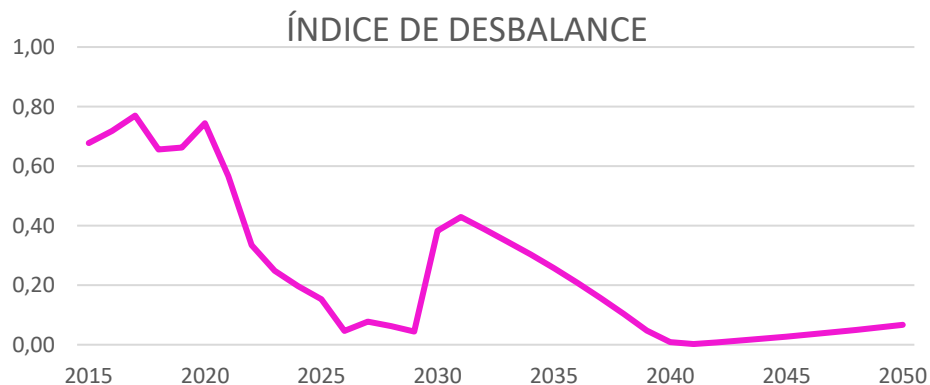


Figura 4-17: Índice de desbalance calculado con los resultados del modelo de la cadena del suministro.



El pronóstico del I.D se enlaza con los valores obtenidos previamente (2010-2016), en el cual había indicios que el sistema iba a continuar en desbalance en los próximos años y esto es corroborado por los resultados del pronóstico, donde a partir del 2022 se pasa del valor medio y se está más cercano al balance a partir del año 2039. A partir de 2039 los volúmenes importados permanecen fijos, hay abastecimiento de la demanda y se da mayor uso a la infraestructura disponible.

Del I.D se puede concluir que, aunque hay vulnerabilidades en el suministro por parte de la producción interna, ésta eventualmente será reemplazada por G.N de origen externo, lo cual llevará a la cadena al mejor estado en la S.E para el año 2041, posteriormente el aumento de la demanda no atendida después de importaciones comenzará a revertir el estado de balance hacia el sentido contrario.

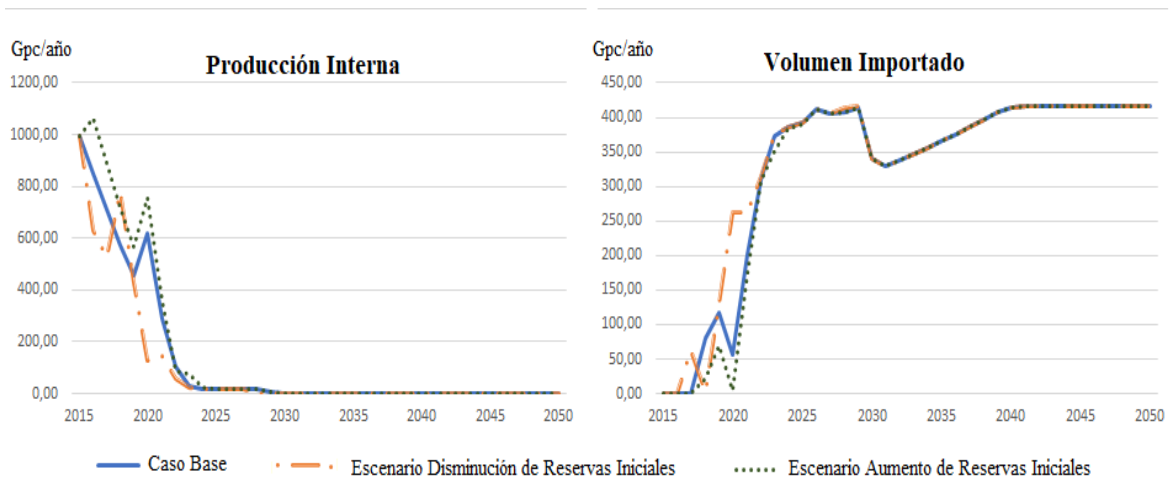
4.3.7 Análisis de sensibilidad

En esta sección se hará la valoración de cuatro parámetros seleccionados y la influencia que tiene cada uno sobre algunos de los indicadores primarios:

- **Reservas iniciales**

Al aplicar una variación en $\pm 20\%$ sobre las reservas iniciales, se registran cambios importantes en las variables producción interna e importación (Ver Figura 4-18). Cuando las reservas iniciales son de 3488 Gpc (-20%) aparecen más pronto en el horizonte de tiempo los picos de producción y el agotamiento del recurso. Si por el contrario se aumenta el inventario inicial (5233 Gpc), deben pasar al menos 6 años después de iniciada la simulación para que la importación comience a abastecer de forma continua al sistema; mientras que la producción comienza con tendencia de aumento, para pasar en los primeros años a una tendencia descendente. Ambas variables: producción e importación, resultan siendo sensibles a los cambios en las reservas iniciales, esto se evidencia porque al modificar un valor puntual del inventario, ambas variables, aunque siguen teniendo el comportamiento original de cada una, si cambian la magnitud en el sentido del cambio de las reservas.

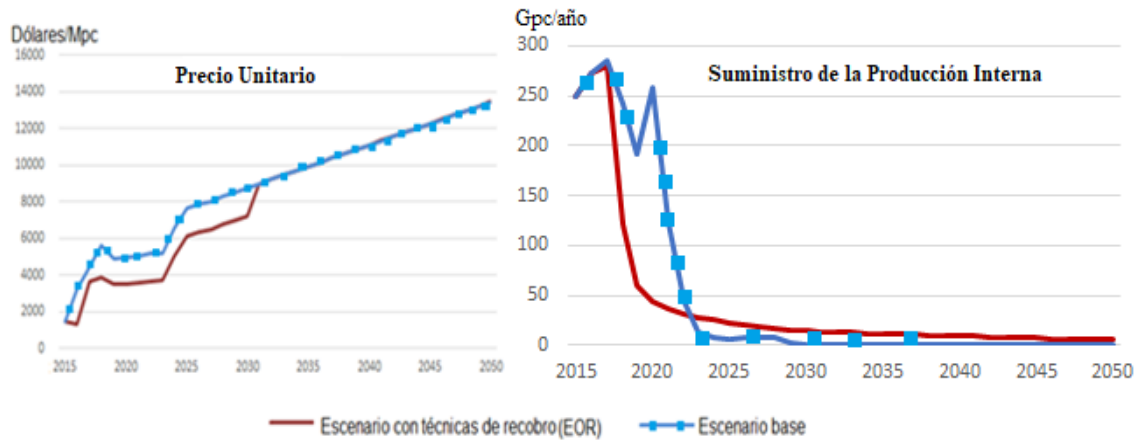
Figura 4-18: Comportamiento de la producción y del volumen importado cuando se varían las reservas iniciales.



▪ Factor de recobro

Las técnicas de recobro mejorado (Enhanced Oil Recovery) permiten aumentar el porcentaje de los recursos a extraer del yacimiento. Si bien en el caso base se aplica esta técnica, la cual pasa de 19% (promedio nacional) al 35 % (promedio máximo), sólo cuando la demanda no atendida por producción es mayor a cero comienza a implementarse en los proyectos, por lo que la técnica no es una respuesta temprana al problema de desabastecimiento. Con el fin de evaluar la sensibilidad del sistema al factor de recobro, se utilizó el factor de 35% desde el primer año y se aplicó independientemente de las señales que se reciban de la demanda. En la Figura 4-19, se puede observar el efecto positivo que tiene el parámetro evaluado sobre algunos indicadores como el precio unitario y el suministro por parte de la extracción de recursos propios. La variable de producción interna mejora el rendimiento del suministro, debido a que el acceso al recurso prolonga el tiempo en el que se puede extraer reduciendo la demanda que no se puede atender. Se nota que el aumento de las reservas a extraer elimina comportamientos de alza repentina en la producción y se obtiene una curva más suavizada. No obstante, el escenario de agotamiento es inevitable si no hay hallazgos relevantes. Implementar de forma temprana las técnicas de recuperación tienen también efecto sobre el precio, aunque mantiene la tendencia al alza, sólo se alcanza los valores del caso base cuando el precio externo tiene mayor influencia sobre el cálculo del precio de venta.

Figura 4-19: Variación del precio unitario y de la producción cuando se mejora el factor de recobro.

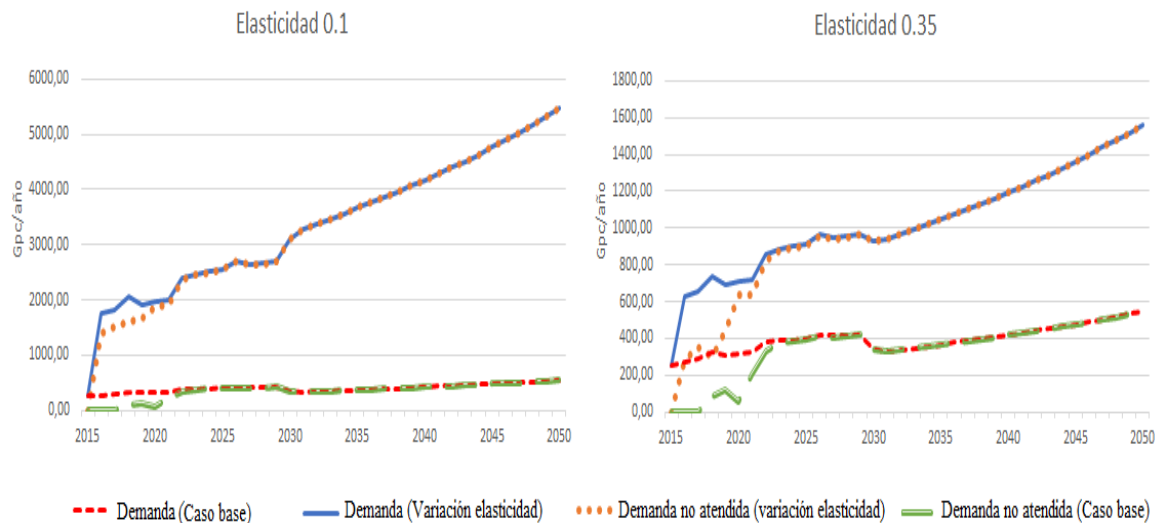


▪ Elasticidad de la demanda

Se utilizará la elasticidad tanto de la demanda regulada como no regulada como base para el análisis. Sin embargo, vale la pena mencionar que en la proyección que se tomó de referencia de la UPME (2015e), se presenta que en el periodo 2000 a 2014 la elasticidad ha sido completamente elástica para sector no regulado, el valor promedio del parámetro durante este periodo fue de 2.3. Mientras que la elasticidad del sector regulado era unitaria, entonces ambos valores fueron utilizados en el módulo de la demanda para lograr el ajuste de la curva. Pero para realizar el análisis de sensibilidad se tendrá en cuenta los valores de elasticidad para ambos tipos de demanda de acuerdo con lo que indica la literatura: Smith (2009, p. 150) sustenta que la elasticidad de la demanda del crudo y sus derivados es perfectamente inelástica (cerca de o iguales a cero). Además, indica que deben de considerarse dos intervalos para el parámetro de acuerdo con periodo simulado: entre 0.02 y 0.04 para corridas cortas mientras que se debe utilizar el intervalo 0.10 a 0.35 para corridas largas. Con el apoyo de la anterior información se usó el valor de elasticidad de 0.1 y luego de 0.35 para observar el comportamiento de los indicadores de demanda y demanda no atendida. En la Figura 4-20 se puede verificar que cuando se utilizan los valores propuestos en la literatura para la elasticidad, lo que ocurre tanto para la demanda como para la demanda no atendida es un comportamiento con tendencia a ser vertical o a crecer infinitamente. Es así como el comportamiento de estos parámetros el modelo

muestra que a pesar de un fuerte crecimiento en el precio del G.N, el consumidor seguirá comprando sin importar el precio de éste, lo cual era el comportamiento esperado de acuerdo a los valores supuestos.

Figura 4-20: Comportamiento de la demanda y demanda no atendida con variación en la elasticidad.



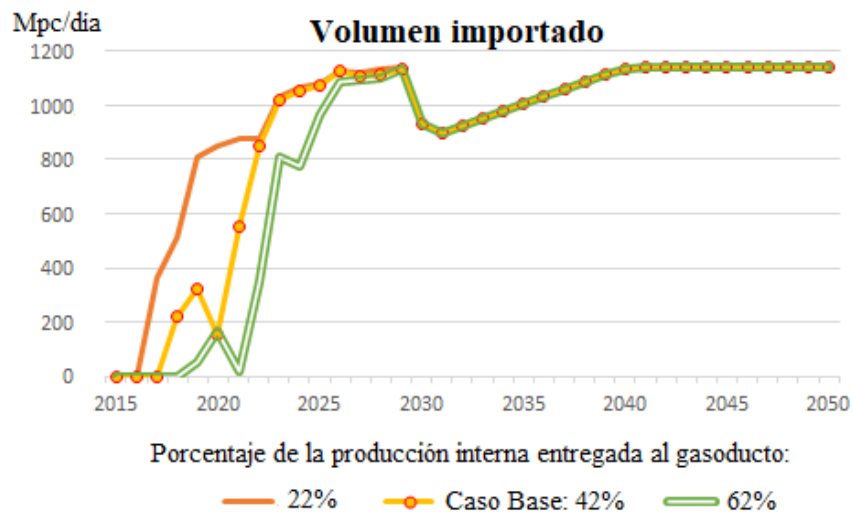
▪ Volumen entregado al gasoducto

El volumen de G.N que se entrega al gasoducto después de ser producido equivale al 42%, el volumen restante es consumido por la industria petrolera. Por lo que al evaluar el efecto de intervenir los consumos o disposición del gas natural antes de ser entregado al gasoducto logrando que este porcentaje de entrega aumente, se puede aplazar la llegada de G.N proveniente del extranjero, tal como se observa en la Figura 4-21. El caso contrario ocurre si por algún motivo se aumenta el consumo de la industria petrolera, el escenario de importación comenzaría a aplicar a partir del 2017, en los escenarios evaluados la producción y las reservas permanecen igual al caso base.

A partir del año 2041 en todos los escenarios evaluados los volúmenes de gas natural importado permanecen constantes, es porque a partir de ese año se comienza a importar de acuerdo con la máxima capacidad de la infraestructura (al menos las planeadas hasta el momento). con la que cuenta el país El caso de entrega del 22% muestra que en el

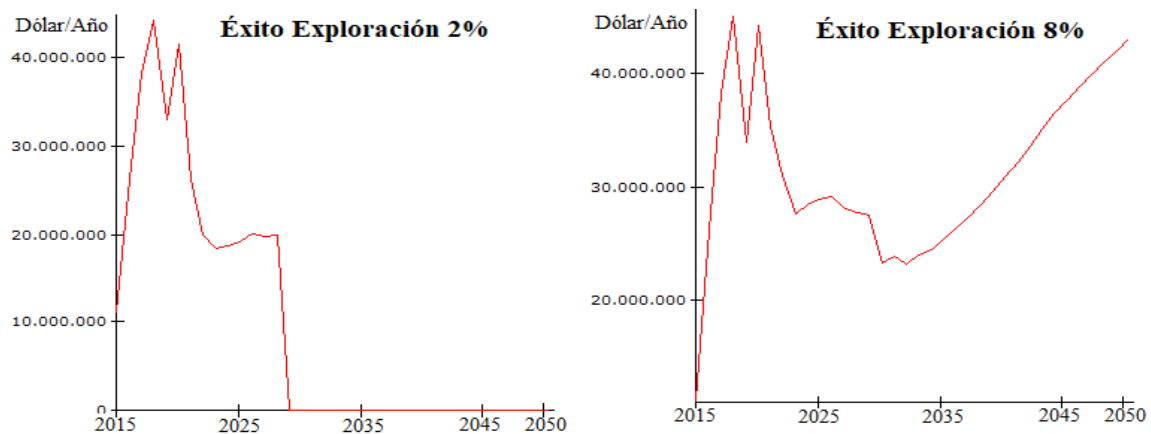
periodo 2019-2022 permanece casi constante (807-880 Mpc/día) la cual es la misma tendencia de la demanda.

Figura 4-21: Volumen importado cuando se aumenta o reduce el porcentaje entregado al gasoducto colombiano.



▪ Éxito en exploración

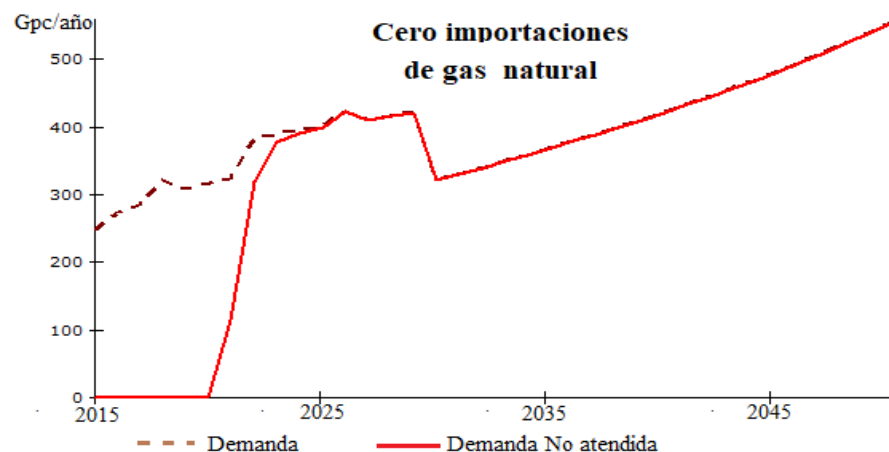
Se evaluó el comportamiento de las inversiones en exploración, cuando se reducen los riesgos en los proyectos. Tal como se muestra en la Figura 4-22, hay un incentivo a invertir en el sector cuando el éxito en la exploración aumenta. El comportamiento es igual al caso base (2%), pero luego hay una reacción a invertir continuamente en los proyectos de gas natural.

Figura 4-22: Inversiones en el sector al reducir el riesgo en la inversión.

▪ Volumen de importación no disponible

Otro de los escenarios a evaluar es la nulidad de importaciones. Esto podría suceder eventualmente por los compromisos de largo plazo de los exportadores, por la creciente demanda mundial y la posibilidad de escasez del energético en el mundo. En la

Figura 4-23, es de notar que la demanda seguirá siendo suplida por la producción interna de acuerdo con las estimaciones del agotamiento, pero ante la imposibilidad de negociar gas natural en el extranjero, la demanda no atendida será igual a la demanda (2025). Las consecuencias de esto sería un mercado completamente desestimulado para invertir e infraestructura en completo desuso.

Figura 4-23: Escenario de cero importaciones.

4.3.8 Diseño y evaluación de políticas

Aunque éste no es uno de los objetivos del modelo se propondrán algunas políticas que se pueden implementar para aumentar la seguridad del suministro de gas natural en Colombia y se discutirán los resultados:

- **Aumentar la inversión en exploración**

Para este caso se aumentó en un 10% la variable de inversión y se observó que los resultados no son muy significativos y la autosuficiencia de gas natural continúa disminuyendo. Luego de variar el parámetro, se llegó a la conclusión que para solventar la brecha que hay en el sector, es necesario mayor inversión por parte de los actores y al aumentar este factor al menos hasta el 80% de las utilidades, habría rendimientos a través de la disminución en los volúmenes importados en el mediano plazo. La inversión en exploración en el sector hidrocarburos está ligada a los precios del petróleo y si hay aumentos en el precio de éste se espera que aumente la inversión. No obstante, la continuidad de la producción doméstica exige aumentos en la exploración por encima de los niveles actuales.

- **Fracturamiento hidráulico**

Al considerar implementar la técnica de fracturamiento hidráulico, la cual ha llevado a los Estados Unidos a incrementar sus inventarios de G.N y si se aplica en Colombia en las reservas existentes en la actualidad, suponiendo un incremento del factor de recobro a 35% se genera un leve cambio de los primeros volúmenes importados a partir del 2018, pero a partir del 2029 se disminuyen en un 10% estos volúmenes. Sin embargo, en esta suposición sigue predominando la dependencia de importación de G.N, por lo que en consecuencia de la política anterior se sospecha que es necesario también continuar con la implementación de ambas políticas en conjunto para alejar en el tiempo la dependencia de G.N.

4.4 Conclusiones

Las pruebas realizadas al modelo planteado permiten ganar confianza sobre en él. Éste reproduce comportamientos esperados bajo condiciones extremas y se ajusta a las proyecciones de demanda. Las limitaciones son: las proyecciones de demanda son

exógenas, los precios se calculan con base en índices internacionales y no se modela su formación directamente.

En el análisis de sensibilidad se observó que las reservas tienen incidencia sobre la producción y la importación. Mientras que el volumen de gas entregado al gasoducto sólo afecta a la importación, dado que un consumo inesperado antes de comenzar la etapa de transporte reducirá el suministro y éste debe ser atendido por la importación. También se determinó que el factor de recobro permite extender los proyectos debido al aumento de los volúmenes a extraer y así poder mantener la producción por algunos años más.

El I.D reveló que durante el periodo 2015 a 2050 la cadena del suministro atravesará al inicio por un desbalance, hacia el 2041 estará en el mejor nivel de balance, pero posteriormente habrá una degradación de la S.E por el creciente amento de la demanda no atendida después de importaciones; lo que sugiere que, aunque la oferta externa del energético puede dar confiabilidad en el suministro, también será necesario la adquisición de infraestructura para aumentar los volúmenes importados.

Finalmente, las inversiones en exploración es la variable que más contribuye a la autosuficiencia en el mediano y largo plazo. Se requiere un estudio más completo del mercado mundial del gas natural con el fin de hacer contratos de suministro de largo plazo.

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Metodología

Para la aplicación del índice de desbalance debe tenerse en cuenta las ventajas que representa, entre ellas está que resume la evolución de la SE a lo largo del tiempo y es flexible con la cantidad de indicadores, así como de las dimensiones. Adicionalmente, este tipo de métrica también conlleva algunas debilidades como, por ejemplo: no es posible aislar el efecto de una variable sobre el índice, dado que todas están implícitamente interrelacionadas. Dentro de las recomendaciones está la reevaluación del método de cálculo del índice, para el cual se usa el de igual ponderación de los indicadores sobre el índice, con esto se define que la influencia de cada métrica es la misma en el sistema, lo cual no es necesariamente cierto. Además, es preciso definir la dirección deseada de los indicadores y acompañar el análisis del ID con los valores obtenidos para los indicadores, con lo cual se podrá determinar el efecto concreto de estos sobre el índice.

De la revisión de literatura se seleccionó la metodología de Dinámica de Sistemas porque permite modelar el comportamiento de sistemas complejos, como es el caso de la cadena de suministro del gas natural. Además, se enfoca en las relaciones de causa y efecto, el comportamiento y significado de los componentes del modelo más que en los resultados obtenidos, siendo estos últimos relevantes para evaluar el estado de la seguridad energética. A partir de las pruebas realizadas, el modelo propuesto resulta siendo válido tanto en la reproducción del comportamiento incluso en condiciones extremas, así también como en la consistencia dimensional y lo apropiado del periodo de tiempo simulado.

Dentro de las limitaciones que presenta el modelo de la cadena de suministro es la falta de dinamismo en sus resultados, lo cual es causado por la falta de elementos aleatorios, y al planteamiento de indicadores como la demanda cuya tendencia en el tiempo es

conocida. Una forma de mejorar los resultados del modelo es reducir el uso de condicionales, para que los valores (especialmente las gráficas) sean suavizados.

5.2 Resultados

La seguridad energética se caracteriza por la diversidad tanto de las definiciones como de los enfoques e indicadores que la enmarcan. En este trabajo se usaron como dimensiones de la cadena del suministro la Disponibilidad, la Accesibilidad, Asequibilidad y Aceptabilidad las cuales incluyeron los aspectos: geológicos, geopolíticos y de infraestructura, económicos y socioambientales, los cuales resultan convenientes para el caso de estudio. De los 120 indicadores de SE encontrados en la literatura, la cadena del suministro del gas natural en Colombia puede ser evaluada a partir de 80 indicadores que incluyen criterios para abordar la S.E. No obstante, a partir de la definición se lograron extraer ocho (8) indicadores los cuales se clasificaron como la representación básica del concepto en la cadena del suministro, dado que al menos cada fase está asociada por lo menos con un indicador y entre ellos hay vínculos de causa-efecto comprobables en el tiempo. Los indicadores primarios del caso de estudio son: Reservas, producción, congestión de infraestructura de transporte, precios promedio, consumo, demanda, PIB y número de habitantes. Estos indicadores son la base para el cálculo de los demás y se agrupan en las cuatro perspectivas predefinidas. El conjunto de indicadores primarios, se utilizaron para evaluar la SE a partir del cálculo de un único índice de desbalance y para la construcción de modelo en el cual se representan las interacciones entre las variables que miden los indicadores y permite hacer la proyección de la evolución de la seguridad energética en el tiempo.

El índice de desbalance valora la S.E en la cadena de suministro permitiendo identificar que entre el 2010 y el 2016, el 2016 fue un año crítico principalmente por la disminución en la producción del gas natural y el 2013 fue el periodo de mayor estabilidad por el consumo total y los precios del energético. Al poder indagar por la causa de un estado en la cadena del suministro a partir de los valores obtenidos por el ID, es posible enfocar esfuerzos para mantener o el sistema hacia el comportamiento deseado.

En el periodo de estudio 2015-2050 (histórico y proyección) la cadena de suministro del gas natural presenta periodos de balance y desbalance. En el panorama se evidencia que el sistema está a pocos años del agotamiento de las reservas internas, cuyo efecto sería la eliminación del eje de suministro interno (exploración, reservas y producción), para ser reemplazado por las importaciones del G.N. Éstas tienen implícito el traspaso de los precios internacionales del G.N al mercado interno, los cuales serán asumidos por la demanda que ha sido constantemente estimulada por la entrega de subsidios e instalación de infraestructura. Por otro lado, si la oferta externa puede dar confianza en el suministro, es necesaria la negociación de contratos de largo plazo, la planeación y continua inversión en infraestructura, para tener la suficiente capacidad de ampliar el inventario conforme crece la demanda. Es por eso que, desde el análisis de la cadena de suministro del gas natural, la seguridad energética en Colombia tiene muchos frentes sobre los cuales se debe trabajar, por ejemplo, definir si el perfil que más le conviene al país es el de sólo importador o productor de gas natural. Aunque una combinación de ambos parece ser una medida para enfrentar las vulnerabilidades a las que se está expuesto si el suministro depende de una única fuente.

En el análisis de sensibilidad del índice de desbalance se determinó que el consumo y la demanda gas natural son las variables a la cual es más sensible el sistema. Pero desde el punto de vista de las debilidades, la principal amenaza del sistema está en la seguridad en el suministro independientemente de su origen, dado que esto genera: aumento en los precios de venta, instalación de nueva infraestructura para importación y obtención del energético en el mercado internacional, aumento de la demanda no atendida, entre otras. Por otro lado, el uso del sistema nacional de transporte es la variable a la cual son menos sensible los demás indicadores.

5.3 Recomendaciones

La construcción del índice de desbalance se ha hecho usando el método de igual ponderación para las dimensiones y los indicadores, se recomienda que el método sea un tema de discusión y análisis en futuros trabajos debido a la afectación y relevancia que tiene cada una de las métricas en el sector energético, las cuales bajo la influencia de otro método de cálculo podrían captar otros aspectos que en este estudio no se identificaron.

También es necesario evaluar si la escala para indicador es la adecuada, por ejemplo, el indicador de precios puede llevar al desbalance si se tienen precios bajos, esto desde la perspectiva de los asociados en la cadena productiva, pero si el foco es la demanda, puede ser positivo porque incentiva la compra del energético, mientras que los precios altos pueden llevar a comportamientos diferentes tanto de la oferta como de la demanda.

El modelo aplicado tiene limitaciones en cuanto a su alcance y a la representación de algunas relaciones. Por tanto, se recomienda modificar la estructura de algunas fórmulas y patrones del modelo. En particular, la demanda ha sido modelada siguiendo las proyecciones encontradas en la literatura, sin embargo, se recomienda usar un modelo propio de predicción de la demanda, aprovechando los datos y las fórmulas que ya dispone el módulo para su predicción.

En la actualidad una de las grandes limitantes que tiene la cadena de suministro estudiada, es la falta de facilidades para el almacenamiento del gas natural. Se cuenta con la red de gasoductos instalada y la planta regasificadora. Sin embargo, durante periodos de desabastecimiento el escenario no sería tan crítico si se dispusiera de puntos de almacenamiento localizados por ejemplo en las ciudades principales o en los puntos de acceso central. Se propone entonces incluir en el modelo este tipo de infraestructura y evaluar su efecto en el sistema, principalmente en la demanda no atendida. Adicionalmente, evaluar la SE por regiones y no por país, también ayudaría a definir el tipo de políticas al hacer esta segregación.

En la metodología aplicada no se calculan o tienen en cuenta los riesgos a los cuales está expuesto el sistema estudiado, principalmente por la importación del energético, por lo que para futuros trabajos es necesario incluir aspectos que tengan en cuenta que se trata de un sistema vulnerable a aspectos internos y externos.

Finalmente, se manifiesta lo oportuno de hacer un análisis crítico con sentido constructivo de lo planteado en esta tesis de investigación, esto como oportunidad de mejora para ayudar a la construcción de futuros trabajos que lleven a una toma de decisiones más acertada y con el enfoque de una meta alcanzable.

A. Anexo: Referencias bibliográficas obtenidas de la búsqueda en Web of Science: “Energy Security” definition.

Las fuentes de información bibliográfica mencionadas en la sección 2.1 Definición de seguridad energética, las cuales fueron obtenidas al realizar la búsqueda de “Energy Security” definition, en la base de datos Web of Science Core Collection se listan a continuación, de acuerdo con la ubicación en el gráfico en forma de árbol obtenido de la herramienta ToS:

Raíz:

- Krut B, 2009, Energ Policy, V37, P2166, doi 10.1016/j.enpol.2009.02.006
- Chester L, 2010, Energ Policy, V38, P887, doi 10.1016/j.enpol.2009.10.039
- Sovacool BK, 2010, Annu Rev Env Resour, V35, P77, doi 10.1146/annurev-environ-042509-143035
- Yergin D, 2006, Foreign Aff, V85, P69, doi 10.2307/20031912
- Sovacool BK, 2011, Energy, V36, P5343, doi 10.1016/j.energy.2011.06.043
- Winzer C, 2012, Energ Policy, V46, P36, doi 10.1016/j.enpol.2012.02.067
- Bielecki Janusz, 2002, Q Rev Ec Finance, V42, P235, doi 10.1016/S1062-9769
- APERC, 2007, Quest En Se 21 Cent
- Jewell J, 2014, Energ Policy, V65, P743, doi 10.1016/j.enpol.2013.10.051
- Sovacool BK, 2011, Rout Int Handb, P1

Tronco:

- Hossain Y, 2016, Energy Res Soc Sci, V16, P89, doi 10.1016/j.erss.2016.03.014
- Sovacool BK, 2009, Energ Policy, V37, P2763, doi 10.1016/j.enpol.2009.03.012

- Below A, 2013, *Energy Policy*, V62, P860, doi 10.1016/j.enpol.2013.07.013
- Olz S., 2007, *Contribution Renewable*
- Criqui P, 2012, *Energy Policy*, V41, P827, doi 10.1016/j.enpol.2011.11.061
- Cox E, 2016, *Energy Res Soc Sci*, V21, P1, doi 10.1016/j.erss.2016.06.020
- Batel S, 2013, *Energy Policy*, V58, P1, doi 10.1016/j.enpol.2013.03.018
- Sovacool BK, 2010, *Annu Rev Env Resour*, V35, P77, doi 10.1146/annurev-environ-042509-143035
- Cooper C, 2013, *J World Energy Law B*, V6, P67, doi 10.1093/jwelb/jws032
- Brown MA, 2014, *Energy Res Soc Sci*, V4, P64, doi 10.1016/j.erss.2014.08.008

Hojas:

- Azzuni A, 2018, *Wires Energy Environ*, V7, Pe268, doi 10.1002/Wene.268
- Cox E, 2016, *Energy Res Soc Sci*, V21, P1, doi 10.1016/J.Erss.2016.06.020
- Glynn J, 2017, *Energy Strateg Rev*, V15, P72, doi 10.1016/J.Esr.2016.11.005
- Valdes J, 2018, *Ecol Econ*, V145, P263, doi 10.1016/J.Ecolecon.2017.09.002
- Jones CR, 2017, *Energy Res Soc Sci*, V28, P17, doi 10.1016/J.Erss.2017.04.002
- Komendantova N, 2015, *Energies*, V8, P9407, doi 10.3390/En8099407
- Moore S, 2017, *Energy Res Soc Sci*, V24, P21, doi 10.1016/J.Erss.2016.12.008
- Below A, 2013, *Energy Policy*, V62, P860, doi 10.1016/J.Enpol.2013.07.013
- Hughes L, 2013, *Energy*, V59, P413, doi 10.1016/J.Energy.2013.06.070
- Celikpala M, 2014, *Uluslar Iliskiler*, V10, P75
- Cooper C, 2013, *J World Energy Law B*, V6, P67, doi 10.1093/Jwelb/Jws032
- Herington MJ, 2016, *Energy Res Soc Sci*, V21, P49, doi 10.1016/J.Erss.2016.06.025
- Kovacic Z, 2015, *Energy*, V93, P67, doi 10.1016/J.Energy.2015.08.116
- Herrero R, 2016, *Rev Unisci*, V, P83, doi 10.5209/RUNI.53788
- Kuhi-Thalfeldt R, 2011, *Oil Shale*, V28, P240, doi 10.3176/Oil.2011.1S.15
- McCarthy J, 2013, *Pac Aff*, V86, P257, doi 10.5509/2013862257
- Dornan M, 2009, *Pac Econ Bull*, V24, P71
- Rafiaani P, 2018, *Renew Sust Energy Rev*, V82, P1839, doi 10.1016/J.Rser.2017.06.118

B. Anexo: Indicadores de la seguridad energética obtenidos en la literatura.

De acuerdo como se menciona en la sección 2.3.1 Indicadores, se realizó una búsqueda de indicadores relacionados a la seguridad energética y se clasificaron de acuerdo a la perspectiva de seguridad energética de cada estudio, el listado completo ordenado por la escala temporal a la que afectan los indicadores, se muestra a continuación indicando la fuente bibliográfica:

Nombre del indicador	Unidades	Dimensión/ Área	Escala temporal		Referencia
			Corto Plazo	Largo Plazo	
Porcentaje de uso de formas modernas de energía (principalmente electricidad) por persona.	%	Asequibilidad	X		(Birol, 2007) Citas: 149
Concentración de oferta de energía.	%	Vulnerabilidad	X		(Chuang & Ma, 2013) Citas: 34
Dependencia de importación de energía.	%	Dependencia			
Emisiones de CO2 por unidad de energía consumida.	t/Kw	Aceptabilidad			
Importación de energía per cápita.	U.M/hab.	Asequibilidad			
Intensidad energética.	%	Vulnerabilidad			
Valor de Importación de energía por unidad de PIB.	%	Asequibilidad			
Petróleo o gas usado per cápita.	toe/año	Dependencia	X		(Costantini, Gracoeva, Markandya, & Vicini, 2007) Citas: 202
Porcentaje de electricidad generada a partir de gas.	%	Dependencia			
Porcentaje de importaciones de petróleo o gas de una región específica con respecto a las importaciones mundiales.	%	Vulnerabilidad demanda			
Porcentaje de importaciones netas con respecto al suministro total de energía primaria.	%	Vulnerabilidad demanda			
Porcentaje de petróleo usado en transporte.	%	Dependencia			
Costo de las importaciones de petróleo y gas.	U.M	Dependencia			
Consumo de energía primaria.	toe	Asequibilidad	X		(Kim, Shin, & Chung, 2011) Citas: 64
Emisiones de CO2.	t CO2	Eficiencia			
Emisiones de CO2 per cápita.	t CO2	Eficiencia			
Población	# hab.	Demografía			
Uso de Energía Primaria por unidad de PIB	toe/U.M	Asequibilidad			
Dependencia económica de energía del sector eléctrico.	%	Resiliencia Operacional		X	(Kisel, Hamburg, Härm, Leppiman, & Ots, 2016) Citas: 11
Días de inventario de productos de petróleo y derivados:	%	Resiliencia Técnica			
a) Exportadores: Valor de combustibles exportados, como un porcentaje del PIB;					
b) Importadores: Importaciones netas de combustible como porcentaje del PIB.					
Margen de reserva de la capacidad de potencia.	%	Resiliencia Técnica			
Oferta potencial de una fuente de energía determinada.	%	Vulnerabilidad			
Porcentaje de la generación que se pierde en la distribución.	%	Vulnerabilidad técnica			
Proporción de energía total usada para el consumo.	%	Vulnerabilidad			
Relación de cubrir picos de consumo con capacidades confiables.	%	Resiliencia			
Relación entre la capacidad intermitente y la carga mínima.	%	Resiliencia Operacional			
Tasa compuesta de crecimiento agregado de la relación de consumo total de energía primaria con el PIB en 5 años.	%	Resiliencia Operacional			

Nombre del indicador	Unidades	Dimensión/ Área	Escala temporal		Referencia
			Corto Plazo	Largo Plazo	
Coefficiente de elasticidad de la negociación o liquidez del mercado.	toe/U.M	Asequibilidad		X	(Kruyt, van Vuuren, de Vries, & Groenenberg, 2009) Citas: 557
Contenido de carbono.	g/GJ	Aceptabilidad			
Criterio de Media Varianza.	U.M	Asequibilidad			
Gasto en energía o petróleo.	U.M	Asequibilidad			
Gobernabilidad - Calidad Regulatoria.	0-10	Accesibilidad			
Gobernabilidad - Estabilidad política y ausencia de violencia.	0-10	Accesibilidad			
Intensidad de Energía o Petróleo.	toe/U.M	Asequibilidad			
Porcentaje de PIB que se está dispuesto a gastar en un país para reducir el riesgo de rupturas en suministro de energía.	%	Accesibilidad			
Porcentaje de fuentes de energía con cero emisiones.	%	Aceptabilidad			
Porcentaje de importación de productos refinados.	%	Disponibilidad			
Porcentaje del sector transporte que no depende del petróleo o gas.	%	Aceptabilidad			
Reservas de carbón.	toe	Disponibilidad			
Reservas de gas.	toe	Disponibilidad			
Reservas de petróleo.	toe	Disponibilidad			
Liquidez del mercado.	%	Asequibilidad y			
Importaciones	toe	Accesibilidad			
Comercio	U.M	Accesibilidad			
Diversidad de proveedores	# proveedores	Accesibilidad y Asequibilidad			
Concentración del mercado	%	Asequibilidad			
Precio petróleo	U.M	Asequibilidad			
Tasa de reservas/producción.	años	Disponibilidad			
Área de suelo donde la acidificación supera la carga crítica.	Km2	Ambiental: Calidad Suelo	X		IAEA (2008) Citas: 147
Calidad elástica del bienestar (relacionada a la energía) por desviaciones		Social	X		
Concentración ambiental de los contaminantes del aire en zonas urbanas.	gramos/ m3	Ambiental Calidad Aire	X		
Dependencia neta de energía importada.	%	Económica/ Seguridad Importaciones	X		
Descargas de contaminantes en los efluentes líquidos procedentes de los sistemas de energía (incluidas las descargas de hidrocarburos).	Kg/ litro	Ambiental Calidad Agua	X		
Accidentes fatales por la producción de energía en la cadena de combustibles.	# personas	Social/ Salud-Seguridad	X		
Eficiencia del suministro de energía.	%	Económica/ Uso y producción	X		
Emisiones de CO2 procedente del sector energético per cápita y por unidad	t per cápita	Ambiental/ Calidad Aire	X		
Emisiones de contaminantes atmosféricos de sistemas energéticos.	t	Ambiental/ Calidad Aire	X		
Intensidad energética de la Industria.	(toe,kWh)/ U.M	Económica/ Uso final	X		
Intensidad energética del PIB.	(toe,kWh)/ PIB	Económica/ Uso final	X		
Intensidad Energética en el Transporte.	toe/km	Económica/ Uso final	X		
Intensidad Energética en la Agricultura.	(toe,kWh)/ U.M	Económica/ Uso final	X		
Mezcla de Energía.	%	Económica/ Uso final	X		
Porcentaje de hogares o población sin electricidad o energía comercial.	%	Social/ Seguridad	X		
Porcentaje de hogares que gasta sus ingresos en combustible y electricidad	%	Social/ Seguridad	X		
Porción de Energías Renovables.	%	Económica/ Diversificación		X	
Precio elástico del bienestar (relacionado a la energía) por desviaciones e	U.M	Económica		X	
Proporción de residuos radiactivos sólidos en espera de eliminación respo	m3	Ambiental/ Residuos sólidos	X		
Proporción de residuos sólidos radiactivos de la producción de energía.	m3	Ambiental/ Residuos sólidos	X		

Nombre del indicador	Unidades	Dimensión/ Área	Escala temporal		Referencia
			Corto Plazo	Largo Plazo	
Relación de residuos sólidos apropiadamente dispuestos respecto a la generación total de residuos sólidos.	%	Ambiental/ Residuos sólidos	X		IAEA (2008) Citas: 147
Participación de fuentes sin carbón en energía y electricidad.	%	Ambiental	X		
Relación de residuos sólidos producidos respecto a las unidades de energía producida.	toe o MWh	Ambiental	X		
Relación recursos/producción.	Años	Económico/ Producción		X	
Relación reservas/producción.	% o Años	Económico		X	
Tasa de crecimiento de PIB por habitante.	U.M/hab.	Economía		X	
Tasa de deforestación atribuida al uso de energía.	%	Ambiental		X	
Uso de energía per cápita.	(toe, kWh) / per cápita	Economía	X		
Uso doméstico de energía para cada grupo de ingresos y la mezcla de combustible correspondiente.	toe, kWh	Social/ Asequibilidad	X		
Descargas de petróleo en aguas costeras.	t	Ambiental	X		
Eficiencia de la energía residencial.	%	Económico	X		
Eficiencia de la energía comercial.	%	Económico	X		
Eficiencia de la energía industrial.	%	Económico	X		
Gasto en energía por casa.	U.M	Social	X		
Porcentaje de producción de electricidad sin emisiones de CO ₂ .	%	Ambiental		X	
Porcentaje de electricidad generada a partir de carbón.	%	Economía		X	
Porcentaje de electricidad generada a partir de energía nuclear.	%	Economía		X	
Precios de la energía de uso final por combustible y sector.	U.M	Economía	X		
Precios del petróleo o gas.	U.M	Economía	X		
Producción de petróleo.	toe	Económico		X	
Producción de gas.	toe	Económico		X	
Producción de carbón.	toe	Económico		X	
Ranking de riesgo político ICRG	0 a 100	Economía	X		
Reservas de combustibles críticos por consumo del combustible correspondiente.	%	Económico/ Patrones de uso		X	
Importación de petróleo y gas.	toe	Económico	X		
Volatilidad en gastos en energía.	U.M	Economía	X		
Volatilidad del precio del petróleo.	U.M	Economía	X		
Utilización de refinerías de petróleo.	%	Economía		X	
Longitud de líneas de transmisión eléctrica.	Millas/ pico GW	Economía		X	
Recorrido promedio por galón de un vehículo.	Millas/galón	Económico	X		
Recorrido promedio de vehículo por costo de combustible.	Millas/U.M	Económico	X		
Gastos en investigación y desarrollo de la industria energética.	U.M/PIB	Social		X	
Gastos nacionales (federales) en investigación y desarrollo.	U.M/PIB	Social		X	
Titulos de ciencia e ingeniería.	# títulos/	Social		X	
Participación de contratos a largo plazo de petróleo y gas.	%	Economía		X	
Eficiencia promedio en producción de electricidad (perdidas en generación)	%	Economía	X		
Capacidad de interconexiones de importación.	%	Economía		X	
Consumo anual de gas.	toe	Económico	X		
Capacidad de importación de gas.	toe	Económico		X	
Máxima salidad de almacenamiento subterráneo.	Mm3/día	Economía		X	
Máxima salidad de facilidades de gas natural licuado.	Mm3/día	Economía		X	
Pico de producción doméstica diaria.	Mm3/día	Económico/ Producción	X		
Demanda promedio de gas en mes pico.	Mm3/día	Economía	X		
Margen de gas.	toe	Economía	X		
Estimado de energía no usada proveniente del gas.	%	Economía	X		
Capacidad de cambio de combustible de plantas de generación.	po	Economía		X	
Contratos interrumpibles.	# contratos	Economía	X		
Preparación - Factor humano.		Social		X	
Consumo de energía eléctrica per cápita.	KWh/# hab.	Social	X		
Número de cortes de energía mensual.	# cortes	Social	X		
Exportación de combustibles.	%	Economía		X	
Distorsión en precios de combustibles por subsidios o impuestos.	U.M	Economía	X		

C. Anexo: Ecuaciones del modelo.

La cadena de suministro del gas natural en Colombia fue modelada utilizando el software PowerSim, para el periodo 2015-2050. El paso de tiempo fue de 1 año y se utilizó como método de integración Euler de primer orden. Las ecuaciones se presentan a continuación: Los datos de parámetros y valores iniciales fueron tomados de fuentes oficiales:

Tabla C- 1: Ecuaciones del módulo de reservas y producción.

Módulo: Reservas-Producción

Nombre	Unidades	Definición
éxito_exploración	%	2
costo_exploración	dollar/Gpc	$\text{EffFracRemainingCost} * \text{'us\$_Gpc'}$
indice_tasa_descubrimiento	Gpc/yr	$\text{éxito_exploración} * \text{inversión_exploración} / \text{costo_exploración}$
us\$_Gpc	dollar/Gpc	1
tasa_descubrimiento	Gpc/yr	$\text{DELAYPPL}(\text{indice_tasa_descubrimiento} * 0.1; 4.5; 0 < \text{Gpc/yr} >)$ Retardo, Fuente: (Chyong Chi et al., 2009)
reservas_probadas	Gpc	inicial_reservas
inicial_reservas	Gpc	4361
factor_reservas	%	$\text{reservas_probadas} / \text{inicial_reservas}$
EffFracRemainingCost		$\text{GRAPH}((\text{factor_reservas}); 0.2; 0.05; \{2300; 2150; 1822; 1700; 1620; 1550; 1500; 1460; 1400; 1380; 1330; 1300; 1250; 1210; 1200; 1180 // \text{Min:0;Max:13000;Zoom//}\})$
reservas_probadas_actual	Gpc	$\text{SAMPLEIF}(\text{YEAR}(\text{TIME}) > 2015; \text{reservas_probadas}; 4361 < \text{Gpc} >)$

Módulo: Reservas-Producción

Nombre	Unidades	Definición
producción	Gpc/yr	MIN(capacidad_instalada_transporte;capacidad_máxima_producir. capacidad_máxima_producción;demanda)*100<<%>>/'Entregado al gasoducto'
tasa_producción	Gpc/yr	MAX(0<<Gpc/yr>>;IF(reservas_probadas_actual>(producción*1<<yr>>);producción;reservas_probadas_actual/1<<yr>>))
producción_actual	Gpc/yr	tasa_producción
produccion_acumulada	Gpc	inicial_producción
inicial_producción	Gpc	876
factor_producción	%	100<<%>>*inicial_producción/produccion_acumulada
Submodelo: reservas_por_extraer		
inicial_reservas	Gpc	REF(Parent~inicial_reservas)
tasa_descubrimiento	Gpc/yr	REF(Parent~tasa_descubrimiento)
muestra_reservas	Gpc	SAMPLEIF(tasa_descubrimiento>0<<Gpc/yr>>;reservas_probadas_actual;inicial_reservas)
reservas_probadas_actual	Gpc	REF(Parent~reservas_probadas_actual)
muestra_tasadesc	Gpc	SAMPLEIF(tasa_descubrimiento>0<<Gpc/yr>>;tasa_descubrimiento*1<<yr>>;0<<Gpc/yr>>)
reserva_a_extraer	Gpc	VBFUNCTION("reservas"= "reservasprove"=reservas_probadas_actual;"tasapro"=muestra_tasadesc;"tasa"=tasa_descubrimiento;"historicoreservas"=muestra_reservas "if tasa>0 then""reservas=reservasprove+tasapro""else""reservas=historicoreservas+tasapro" "End if")<<Gpc>>
Submodelo: capacidad_máxima_producir		
recobro_convencional	%	19
EOR	%	16
factor_recobro	%	DELAYINF(recobro_convencional+demanda_no_atendida_por_producción*EOR;1;2;recobro_convencional)
capacidad_máxima_producción	Gpc/yr	MAX(0 <<Gpc/yr>>;reserva_a_extraer*factor_recobro/'vida útil'. 'vida útil')
tasa_descubrimiento	Gpc/yr	REF(Parent~tasa_descubrimiento)

Módulo: Reservas-Producción

Nombre	Unidades	Definición
reserva_a_extraer	Gpc	REF(Parent~reservas_por_extraer.reserva_a_extraer)
Submodelo: vida útil		
Máximo_años_a_explotar	unidades	35
tasa_descubrimiento	Gpc/yr	REF(Parent~tasa_descubrimiento)
años_aumentavida útil	unidades/yr	IF(tasa_descubrimiento>0<<Gpc/yr>>; 1<<unidades/yr>>*tasa_descubrimiento*25<<yr>>/4000<<Gpc>>;0<<unidades/yr>>)
nivel_devida útil	unidades	11
paso_años	unidades/yr	IF('nivel_devida útil'>0<<unidades>>;1<<unidades/yr>>;0<<unidades/yr>>)
vida útil	yr	'nivel_devida útil'*1<<yr/unidades>>

Tabla C- 2: Formulación matemática del módulo de transporte.**Módulo: Transporte**

Nombre	Unidades	Definición
plan_expansión	Mpc/da	8.3<<Mpc/da>>*0.05
expansión_mínima	Gpc/yr	Mpcd a Gpc_yr'*plan_expansión/1<<yr>>
aumento_capacidad_transporte	Gpc/yr	IF('demanda no atendida_por transporte'=1 AND variación_capacidad_transporte<=10<<%>>;expansión_mínima;0<<Gpc/yr>>)
tasa_aumento_capacidad	Gpc/yr	DELAYINF(aumento_capacidad_transporte;1;2)
capacidad_instalada_transporte	Gpc/yr	capacidad_inicial
capacidad_año_anterior	Gpc/yr	SAMPLEIF(YEAR(TIME)>2015;capacidad_instalada_transporte;capacidad_inicial)
variación_capacidad_transporte	%	DELAYPPL((capacidad_instalada_transporte/capacidad_año_anterior)*100<<%>>;1<<yr>>;0<<%>>)
Mpcd a Gpc_yr	da*Mpc/Mpc	365<<da>>*0.001<<Gpc/Mpc>>
capacidad_interior	Mpc/da	1009
capacidad_costa_caribe	Mpc/da	738
capacidad_inicial	Gpc/yr	(capacidad_costa_caribe+capacidad_interior)*'Mpcd a Gpc_yr'/1<<yr>>

Tabla C- 3: Uso de ecuaciones para el módulo de demanda

Módulo: Demanda		
Nombre	Unidades	Definición
elasticidad_de_manda_regulada		1
demanda regulada	Gpc/yr	(sector_residencial.demanda_residencial)*elasticidad_demanda_regulada
sector_petroquímico	Gpc/yr	7.1
demanda_no_regulada_total	Gpc/yr	sector_comercial.demanda_comercio+sector_industrial.demanda_industrial+sector_petroquímico+sector_petrolero.demanda_sector_petrolero+sector_transporte.demanda_sector_transporte+sector_termoeléctrico.demanda_sector_termoeléctrico
elasticidad sector no regulado		2.3
precio_año_anterior	dollar/yr	DELAYPPL(precio_promedio_ponderado;1<<yr>>;329000000<<dollar/yr>>)
variación_anual_precio	dollar/yr	DELAYPPL(precio_promedio_ponderado-precio_año_anterior;1<<yr>>;0<<dollar/yr>>)
demanda_no_regulada	Gpc/yr	IF(variación_anual_precio=0<<dollar/yr>>;demanda_no_regulada_total;AVERAGE(demanda_no_regulada_total/('elasticidad sector no regulado');demanda_no_regulada_total))
GBTUD_a_Gpc_yr	Gpc/(yr*GBTUD	0,35437
escenario T1 2030_2050	Gpc/yr	GRAPHCURVE(YEAR(TIME);2030;5;{331;380;434;496;570})*(1000/365)*1<<GBTUD>>*GBTUD_a_Gpc_yr
demanda	Gpc/yr	IF(YEAR(TIME)=2015;250<<Gpc/yr>>;IF(YEAR(TIME)<2030;'demanda regulada'+demanda_no_regulada;'escenario T1 2030_2050'))
Submodelo: sector_residencial		
potencial_inicial	clientes	10159669
potencial_residencial	clientes	potencial_inicial
conexiones_residenciales	yr	27
tasa_conexiones_residencial	clientes/yr	potencial_residencial*conexiones_residenciales
conectados_inicial_residencial	clientes	8160555
conectados_residencial	clientes	conectados_inicial_residencial

Módulo: Demanda

Nombre	Unidades	Definición
dresidencial_a partir del_2030	Gpc/yr	SAMPLEIF(YEAR(TIME)=2029;conectados_residencial*'consumo promedio_residencial'*(1+'incremento consumo_residencial');0<<Gpc/yr>>)
incremento consumo_residencial	%	42.5
consumo promedio_residencial	Gpc/(yr*clientes)	2.66e-6<<Gpc/clientes>>/1<<yr>>
demanda_residencial	Gpc/yr	IF(YEAR(TIME)<2030;conectados_residencial*'consumo promedio_residencial'*(1+'incremento consumo_residencial');'dresidencial_a partir del_2030')
Submodelo: sector_comercial		
potencial_comercio	clientes	120078
incremento_conexion_comercial	%	0.118
conexiones_comercial	clientes/yr	8815
constante_yr	yr	1
tasa_conexiones_comercio	clientes	conexiones_comercial*constante_yr*incremento_conexion_comercial
conectados_inicial_comercio	clientes	150848
dcomercial_a partir_2030	Gpc/yr	SAMPLEIF(YEAR(TIME)=2029;'conectados_comercio e industria'*consumo_promedio_comercial*(1+incremento_consumo_comercial);0<<Gpc/yr>>)
incremento_consumo_comercial	%	50
consumo_promedio_comercial	Gpc/(yr*clientes)	7.7109E-05
demanda_comercio	Gpc/yr	IF(YEAR(TIME)<2030;'conectados_comercio e industria'*consumo_promedio_comercial*(1+incremento_consumo_comercial);'dcomercial_a partir_2030')
Submodelo: sector_industrial		
consumo_inicial_industrial	Gpc/yr	200
muestra_demanda_industrial	Gpc/yr	SAMPLEIF(YEAR(TIME)<2030;demanda_industrial;consumo_inicial_industrial)

Módulo: Demanda

Nombre	Unidades	Definición
incremento_consumo_industrial	%	2.16
demanda_industrial	Gpc/yr	DELAYPPL(muestra_demanda_industrial*(1+incremento_consumo_industrial);1<<yr>>;consumo_inicial_industrial)
Submodelo: sector_petrolero		
consumo_inicial_petrolero	Gpc/yr	40
muestra_sector_petrolero	Gpc/yr	SAMPLEIF(YEAR(TIME)>2014;crecimiento_demanda;consumo_inicial_petrolero)
incremento_consumo	%	5
crecimiento_demanda	Gpc/yr	DELAYPPL(muestra_sector_petrolero*(1+'incremento_consumo');1<<yr>>;consumo_inicial_petrolero)
máxima_capacidad_sector_petrolero	Gpc/yr	125
demanda_sector_petrolero	Gpc/yr	IF(YEAR(TIME)<=2021;crecimiento_demanda;máxima_capacidad_sector_petrolero)
Submodelo: sector_transporte		
consumo_inicial_transporte	Gpc/yr	34.8
muestra_demanda	Gpc/yr	SAMPLEIF(YEAR(TIME)<2030;demanda_sector_transporte;consumo_inicial_transporte)
incremento_consumo_transporte	%	2.62
demanda_sector_transporte	Gpc/yr	DELAYPPL(muestra_demanda*(1+'incremento_consumo_transporte');1<<yr>>;consumo_inicial_transporte)
Submodelo: sector_termoeléctrico		
incremento_consumo_termoeléctrica_2019	%	0.5
consumo_inicial_termoeléctrica_2019	Gpc/yr	15
muestra_termoeléctrica_2019_2029	Gpc/yr	SAMPLEIF(YEAR(TIME)>2019;demanda_termoeléctrica_2019_2029;consumo_inicial_termoeléctrica_2019)
demanda_termoeléctrica_2019_2029	Gpc/yr	DELAYPPL(muestra_termoeléctrica_2019_2029*(1+incremento_consumo_termoeléctrica_2019);1<<yr>>;consumo_inicial_termoeléctrica_2019)

Módulo: Demanda

Nombre	Unidades	Definición
dtermoeléctrico_desde_2030	Gpc/yr	SAMPLEIF(YEAR(TIME)=2029;demanda_termoeléctrica_2019_2029;0<<Gpc/yr>>)
demanda_real_termoeléctrica_2019_2050	Gpc/yr	IF(YEAR(TIME)<2030;demanda_termoeléctrica_2019_2029;'dtermoeléctrico_desde_2030')
incremento_consumo_termoeléctrica_2015	%	0.01
consumo_inicial_termoeléctrica_2015	Gpc/yr	15
muestra_termoeléctrica_2015_2017	Gpc/yr	SAMPLEIF(YEAR(TIME)>2014;demanda_termoeléctrica_2015_2017;consumo_inicial_termoeléctrica_2015)
demanda_termoeléctrica_2015_2017	Gpc/yr	DELAYPPL(muestra_termoeléctrica_2015_2017*(1+incremento_consumo_termoeléctrica_2015);1<<yr>>;consumo_inicial_termoeléctrica_2015)
interconexión_Centroamérica_Cerromatoso_2018	Gpc/yr	50
consumo_2026	Gpc/yr	40
demanda_sector_termoeléctrico	Gpc/yr	IF(YEAR(TIME)<=2017;demanda_termoeléctrica_2015_2017;IF(YEAR(TIME)=2018;interconexión_Centroamérica_Cerromatoso_2018;IF(YEAR(TIME)=2026;consumo_2026;demanda_real_termoeléctrica_2019_2050)))

Tabla C- 4: Formulación matemática del subsistema de costos.**Módulo: Costos**

Nombre	Unidades	Definición
costo_promedio_unitario	dollar/Gpc	IF(volumen_a_importar.volumen_importado>0<<Gpc/yr>>;AVERAGE(costo_unitario_importación.costo_unitario_compra_interno;costo_unitario_interno.costo_unitario_pdn_interior);costo_unitario_interno.costo_unitario_pdn_interior)
retorno	%	25
precio_promedio_ponderado	dollar/yr	(costo_promedio_unitario*suministro_nacional+costo_unitario_importación.costo_unitario_compra_interno*volumen_a_importar.volumen_importado)*(1+retorno)

Módulo: Costos

Nombre	Unidades	Definición
costo_promedio_transporte	dollar/Gpc	1186000
utilidad	dollar/yr	$(\text{retorno} * \text{suministro_nacional} * \text{costo_promedio_unitario}) + (\text{retorno} * \text{costo_promedio_transporte} * \text{volumen_a_importar} - \text{volumen_importado})$
inversión_exploración	dollar/yr	$\text{IF}(\text{brecha_res_pdn} - \text{brecha_r_pdn} > 0; 15\% * \text{utilidad}; 0)$
Submodelo: costo_unitario_interno		
MBTUD a Gpc_año	Gpc/MBtu	9.7087E-07
precio_prom_HH	dollar/MBtu	$\text{IF}(\text{YEAR}(\text{TIME}) \leq 2022; \text{GRAPHCURVE}(\text{YEAR}(\text{TIME}); 2015; 1; \{2.6; 2.5; 3.4; 3.0; 2.7; 2.8; 2.9; 3\}); \text{GRAPHCURVE}(\text{YEAR}(\text{TIME}); 2023; 1; \{3.047; 3.1712; 3.295; 3.4188; 3.4; 3.547; 3.694\}); \text{Min}: -1; \text{Max}: 11)$
Precio_prom_boca_de_pozo	dollar/Gpc	$\text{precio_prom_HH} / \text{MBTUD a Gpc_año}$
costo_unitario_pdn_interno	dollar/Gpc	$\text{costo_exploración} + \text{Precio_prom_boca_de_pozo} * (100 - \text{factor_producción}) + \text{costo_promedio_transporte}$
factor_producción	%	$\text{REF}(\text{Parent} \sim \text{factor_producción})$
costo_exploración	dollar/Gpc	$\text{REF}(\text{Parent} \sim \text{costo_exploración})$
Submodelo: costo_unitario_importación		
MBTUD a Gpc_año	Gpc/MBtu	9.7087E-07
índice_NBP	dollar/MBtu	$\text{IF}(\text{YEAR}(\text{TIME}) \leq 2024; \text{GRAPHCURVE}(\text{YEAR}(\text{TIME}); 2015; 1; \{6.3; 4.8; 5.4; 4.8; 3.75; 3.7; 3.7; 3.75; 3.8; 5.8\}); \text{GRAPHCURVE}(\text{YEAR}(\text{TIME}); 2025; 1; \{7.4; 7.65\}); \text{Min}: -1; \text{Max}: 11)$
precio_prom_interno	dollar/Gpc	$\text{índice_NBP} / \text{MBTUD a Gpc_año}$
costo_prom_transp_interno	dollar/Gpc	185400
costo_regasificación	dollar/Gpc	412000
costo_unitario_comp	dollar/Gpc	$\text{costo_prom_transp_interno} + \text{costo_regasificación} + \text{precio_prom_interno}$

Módulo: Costos

Nombre	Unidades	Definición
ra_interna		
Submodelo: volumen_a_importar		
Mpcda Gpc_yr	da*Mpc/Mpc	REF(Parent~'Mpcda Gpc_yr')
capacidad_gasoducto_internacional	Gpc/yr	IF(YEAR(TIME)<2018;0<<Gpc/yr>>;480<<Mpc/da>>*'Mpcda Gpc_yr'/1<<yr>>)
% uso gasoducto internacional	Gpc/yr	100<<%>>*IF(volumen_importado<='capacidad regasificación'; 0;(volumen_importado-'capacidad regasificación')/capacidad_gasoducto_internacional)
capacidad regasificación	Gpc/yr	IF(YEAR(TIME)<2017;0 <<Gpc/yr>>;IF(YEAR(TIME)<2023;400 <<Mpc/da>>*'Mpcda Gpc_yr'/1<<yr>>;660 <<Mpc/da>>*'Mpcda Gpc_yr'/1<<yr>>))
% uso regasificadora	%	IF('capacidad regasificación'=0<<Gpc/yr>>;0;IF(volumen_importado>='capacidad regasificación'; 1;volumen_importado/'capacidad regasificación'))*100<<%>>
volumen_importado	Gpc/yr	IF(YEAR(TIME)=2015; 0<<Gpc/yr>>;IF(demanda_no_atendida<='capacidad regasificación';demanda_no_atendida;'capacidad regasificación'+(IF(('capacidad regasificación'+capacidad_gasoducto_internacional)>demanda_no_atendida;demanda_no_atendida-'capacidad regasificación';capacidad_gasoducto_internacional))))
Submodelo: brecha_res_pdn		
producción_actual	Gpc/yr	REF(Parent~producción_actual)
reservas_probadas_actuales	Gpc	REF(Parent~reservas_probadas_actual)
relación r_pdn real	yr	reservas_probadas_actuales/producción_actual
relación r_pdn deseada	yr	
brecha_r_pdn	yr	IF('relación r_pdn real'>'relación r_pdn deseada';0<<yr>>;'relación r_pdn deseada'-'relación r_pdn real')

Tabla C- 5: Fórmulas de la oferta de gas natural.

Módulo: Oferta

Nombre	Unidades	Definición
Entregado al gasoducto	%	42
suministro_nacional	Gpc/yr	MIN(capacidad_instalada_transporte;demanda;tasa_producción*'Entregado al gasoducto')
demanda_no_atendida	Gpc/yr	IF(demanda>suministro_nacional;demanda-suministro_nacional;0<<Gpc/yr>>)
oferta_real	Gpc/yr	IF(demanda_no_atendida>0<<Gpc/yr>>;suministro_nacional+volumen_a_importar.volumen_importado;suministro_nacional)
demanda_no_atendida_después_importaciones	Gpc/yr	IF(demanda_no_atendida>oferta_real AND demanda_no_atendida>0<<Gpc/yr>>;demanda_no_atendida-oferta_real;0<<Gpc/yr>>)
uso_gasoductos	%	100<<%>>*(oferta_real/capacidad_instalada_transporte)+15<<%>>
demanda no atendida_por transporte	Gpc/yr	IF(uso_gasoductos>=95<<%>> OR demanda_no_atendida>0<<Gpc/yr>>;1;0)
demanda_no_atendida_por producción	Gpc/yr	IF(uso_gasoductos<100<<%>> AND demanda_no_atendida>0<<Gpc/yr>>;1;0)

D. Anexo: Validación del modelo

La validación hace parte del proceso de formulación del modelo. En la sección 4.3.4 se presenta la prueba de adecuación del límite y una primera discusión de condiciones extremas. A continuación, se presentan otras pruebas como complemento a las discutidas en la sección mencionada y que son igual de relevantes.

- **Consistencia dimensional**

Se corroboró la consistencia de variables de nivel al examinar que los resultados fueran valores mayores o iguales a cero en todo el periodo de estudio. Además, durante la construcción del modelo en PowerSim se ingresaron para cada variable las respectivas unidades y ecuaciones, las cuales son utilizadas por el software para el análisis dimensional. Ante el informe de errores se procedió a la evaluación y corrección de inconsistencias dimensionales.

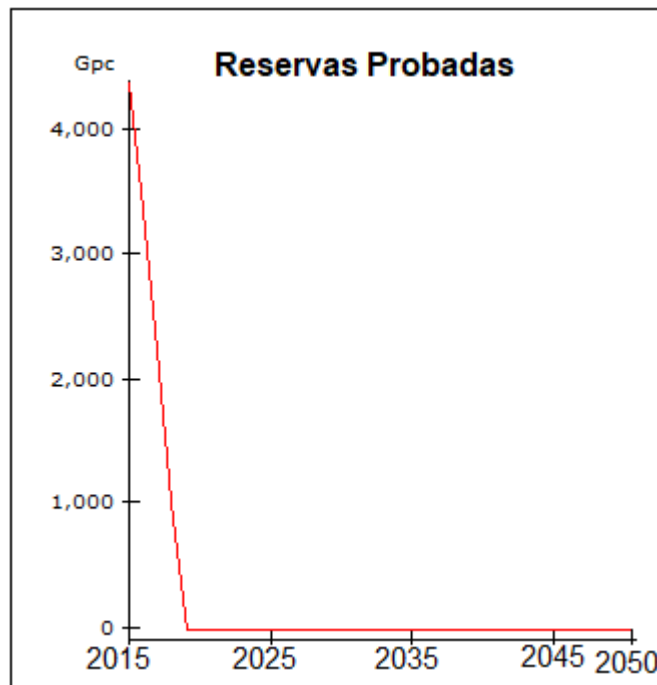
- **Estimación de parámetros**

Para este paso se usó la herramienta “Analysis Variables” del software PowerSim para calibrar cada uno de los subsistemas. Se observaron variaciones en los resultados al aplicar variaciones sobre los parámetros, por ejemplo, al modificar a partir del 2020 la elasticidad del sector regulado o no regulado (± 0.5) se observó un desajuste de la curva de demanda con respecto a la proyección de la UPME, para ambos parámetros. La probabilidad de éxito de exploración se planteó bajo dos escenarios, ambos con variación del 50% del parámetro respecto al valor original. Se comprobó que al reducir las probabilidades de éxito se reducen los hallazgos e inversamente al duplicar el parámetro hay nueva adición de reservas al sistema. Finalmente, se concluye que hay consistencia en los parámetros con respecto al comportamiento real del sistema.

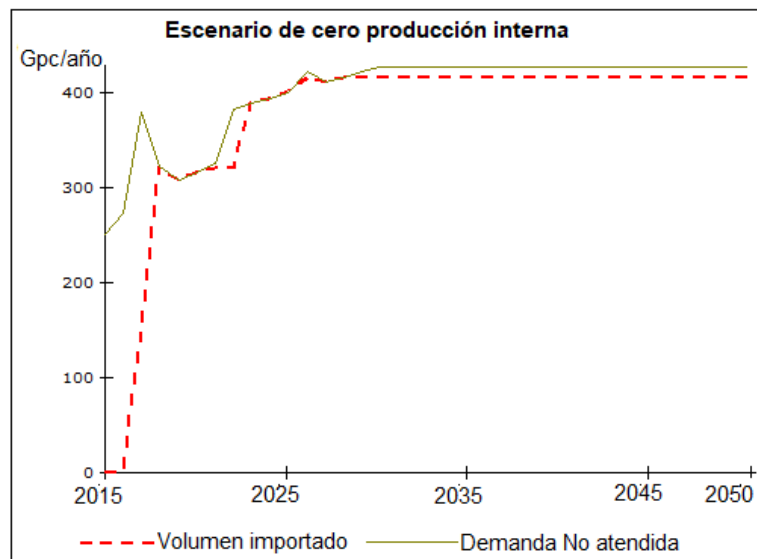
▪ **Condiciones extremas**

Uno de los comportamientos a evaluar es el de las reservas probadas bajo un escenario de cero descubrimientos en el periodo analizado. Se comprueba en la Figura D- 1 el agotamiento del recurso que ocurrirá en el 2018 en concordancia con lo pronosticado por UPME (2015d) y lo cual no es muy lejano al panorama actual del país.

Figura D- 1: Reservas probadas suponiendo cero descubrimientos.



Se supuso un escenario de cero producción nacional a partir del año 2015 (Figura D- 2), con el fin de evaluar otra condición extrema. Ante el desabastecimiento de G.N en el sistema, la oferta se restablece con gas natural importado. Sin embargo, esta acción sólo se logra en el año 2018 debido al efecto de los retardos sobre el sistema.

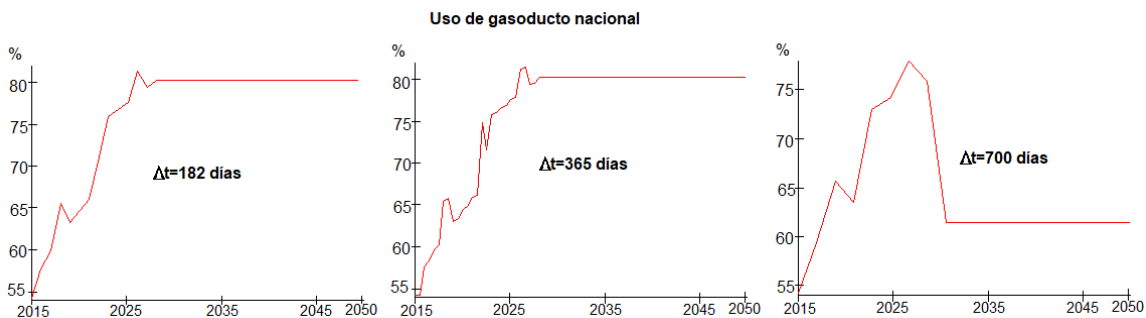
Figura D- 2:Evaluación de condición extrema de producción interna.

▪ Error de integración

Para evaluar si hay sensibilidad de los resultados a la escala de tiempo analizada, por lo que se realizó la simulación reduciendo el periodo de estudio (2015-2032) y se encontró igualdad en los resultados entre ambas corridas, concluyendo así que no hay sensibilidad del modelo a la escala de tiempo evaluada, entonces la escala de tiempo no es lo suficientemente prolongada como para observar cambios en los resultados ante variaciones en el periodo proyectado.

También se varió el paso del tiempo, el cual está configurado como anual (365 días). Al reducirlo a aproximadamente la mitad (182 días), se nota que el comportamiento sigue la misma tendencia, pero hay más detalle en las curvas, exhibiendo picos que habían sido suavizados por el paso de tiempo anual (igual ocurre para un paso de tiempo de 90 días). Por el contrario, cuando se duplica la escala de tiempo (700 días), ocurren cambios significativos en el sistema como la disminución de la demanda de gas natural a partir del 2026, por lo que se disminuyen las importaciones. El comportamiento de la variable uso del gasoducto se muestra en la Figura D- 3 y sirve para ejemplificar la conducta del modelo ante la variación del paso del tiempo. De acuerdo con lo observado en el comportamiento, se decide continuar simulando con paso de tiempo de un año porque sigue representando el comportamiento del sistema bajo esta escala de tiempo.

Figura D- 3: Comportamiento del uso de la red de gasoductos al variar el paso de tiempo de la simulación.



El software utilizado dispone de cuatro integraciones de diferente orden:

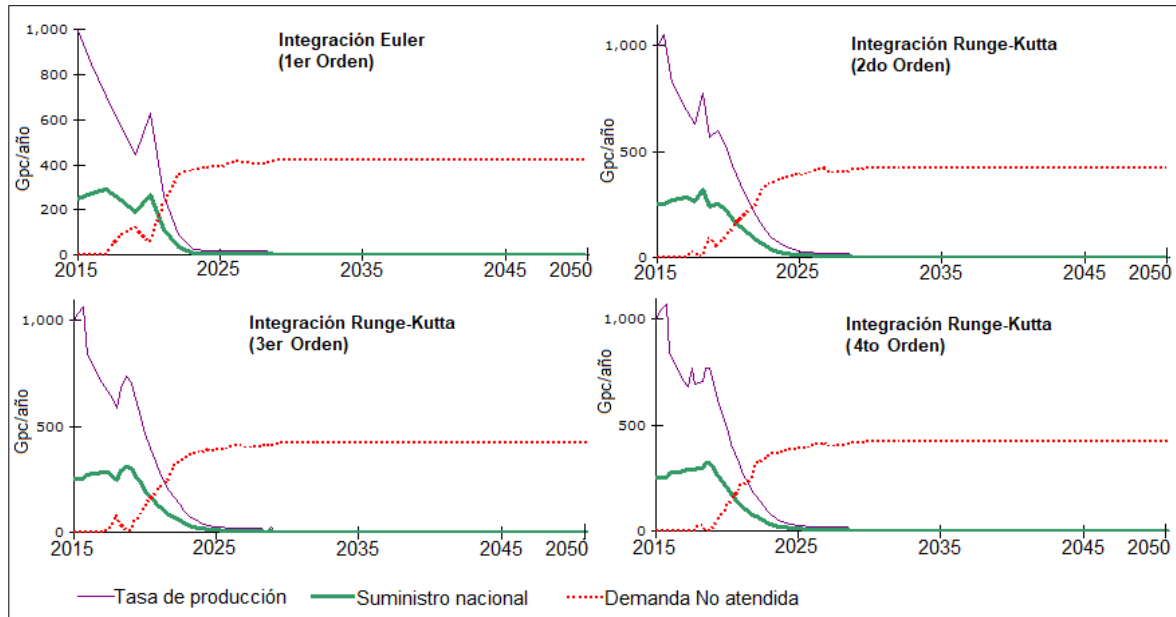
- Primer orden, Euler (paso fijo): Un cálculo por paso de tiempo (365 días).
- Segundo orden, Runge Kutta (paso fijo): Dos cálculos por paso de tiempo (121)
- Tercer orden, Runge Kutta (paso fijo): Tres cálculos por paso de tiempo (182 días)
- Cuarto orden, Runge Kutta (paso fijo): Cuatro cálculos por paso de tiempo (91 días)

De lo anterior se deduce que el software aumenta la cantidad de cálculos en cada corrida proporcionalmente al orden de la integración, de ahí que cada vez que se realice un cambio, debe variarse el paso del tiempo en la misma proporción de la jerarquía de la integración, en la Figura D- 4 se muestra los resultados obtenidos al realizar este cambio en la modelación. La principal diferencia al aplicar esta prueba está en la suavidad o rigidez de las curvas principalmente en el módulo de costos, las cuales están más afinadas en la integración de mayor nivel, esto lleva a que cause variaciones importante en el comportamiento de todo el sistema, como lo es la reacción de la demanda no atendida respecto a la disminución del suministro, intuitivamente se esperaría que la primera aumente ante disminución de la oferta, lo cual no es tan claro principalmente en las integraciones de tercer y cuarto orden. Otro cambio de comportamiento importante está en el valor de la producción en el primer año, el cual comparado con la realidad tiene tendencia a disminuir y en tres de las integraciones comienza con un alza.

Los anteriores criterios sirven como soporte para concluir que la integración Euler de primer orden es la más recomendada para simular el sistema, pese a tener el comportamiento

más rígido, el cual se observa en la gráfica de las variables, es el método que mejor representa el sistema.

Figura D- 4:Resultados del modelo al variar el método de integración.



Bibliografía

- Alonso-Cifuentes, J. C. (2004). Números índices. *Apuntes de Economía*, 29.
- Ang, B. W., Choong, W. L., & Ng, T. S. (2015). Energy security: Definitions, dimensions and indexes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 1077-1093. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.064>
- Asia Pacific Energy Research Centre (Ed.). (2007). *A quest for energy security in the 21st century: resources and constraints*. Tokyo: Inst. of Energy Economics, Japan.
- Azzuni, A., & Breyer, C. (2018). Definitions and dimensions of energy security: a literature review: Definitions and dimensions of energy security. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 7(1), e268. <https://doi.org/10.1002/wene.268>
- Below, A. (2013). Obstacles in energy security: An analysis of congressional and presidential framing in the United States. *Energy Policy*, 62, 860-868. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.07.013>
- Bielecki, J. (2002). Energy security: is the wolf at the door? *The quarterly review of economics and finance*, 42(2), 235–250.
- Birol, F. (2007). Energy economics: a place for energy poverty in the agenda? *The energy journal*, 1–6.
- BP. (2016). *BP statistical review of world energy* (p. 48). Recuperado de <https://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/statistical-review-2016/bp-statistical-review-of-world-energy-2016-full-report.pdf>
- Cherp, A., Adenikinju, A., Goldthau, A., Hughes, L., Jansen, J., Jewell, J., ... Vakulenko, S. (2012). Energy and security. Recuperado de <http://pure.iiasa.ac.at/10062/1/GEA%20Chapter%205%20Energy%20and%20Security.pdf>
- Cherp, A., & Jewell, J. (2010). *International handbook of energy security*. Cheltenham, UK ; Northampton, MA, USA: Edward Elgar.
- Cherp, A., & Jewell, J. (2011). The three perspectives on energy security: intellectual history, disciplinary roots and the potential for integration. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 3(4), 202-212. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2011.07.001>
- Chester, L. (2010). Conceptualising energy security and making explicit its polysemic nature. *Energy Policy*, 38(2), 887-895. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.10.039>
- Chuang, M. C., & Ma, H. W. (2013). An assessment of Taiwan's energy policy using multi-dimensional energy security indicators. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 17, 301-311. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.09.034>
- Chyong Chi, K., Nuttall, W. J., & Reiner, D. M. (2009). Dynamics of the UK natural gas industry: System dynamics modelling and long-term energy policy analysis. *Technological Forecasting and Social Change*, 76(3), 339-357. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2008.06.002>

- Costantini, V., Gracceva, F., Markandya, A., & Vicini, G. (2007). Security of energy supply: Comparing scenarios from a European perspective. *Energy Policy*, 35(1), 210-226. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2005.11.002>
- Cox, E. (2016). Opening the black box of energy security: A study of conceptions of electricity security in the United Kingdom. *Energy Research & Social Science*, 21, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2016.06.020>
- CREG. Resolución # 204 DE 2013 (18 DIC. 2013) (2013). Recuperado de <http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1aed427ff782911965256751001e9e55/f3263e886e871a5f05257c510070c073?OpenDocument>
- CREG. (2016). Resolución No. 029 De 2016. Recuperado de <http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/11d218ae3d892c1605257f70004ed535?OpenDocument>
- Criqui, P., & Mima, S. (2012). European climate—energy security nexus: A model based scenario analysis. *Energy Policy*, 41, 827-842. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.11.061>
- deLlano-Paz, F., Martínez Fernandez, P., & Soares, I. (2016). Addressing 2030 EU policy framework for energy and climate: Cost, risk and energy security issues. *Energy*, 115, 1347-1360. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.01.068>
- Ecopetrol. (2015, diciembre 2). Ecopetrol anuncia medidas adicionales en eficiencia y reducción de costos. Recuperado de <http://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/nuestra-empresa/sala-de-prensa/boletines-de-prensa/Boletines%202015/Boletines%202015/Ecopetrol-anuncia-medidas-adicionales-eficiencia-reduccion-costos>
- Ermolaev, S. (2017). The Formation and Evolution of the Soviet Union's Oil and Gas Dependence, 36.
- Forrester, J. W. (1989). Banquet Talk at the international meeting of the System Dynamics Society Stuttgart, 16.
- Forrester, J. W. (1992). Policies, decisions and information sources for modeling. *European Journal of Operational Research*, 59(1), 42-63. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(92\)90006-U](https://doi.org/10.1016/0377-2217(92)90006-U)
- García-Gusano, D., Iribarren, D., & Garraín, D. (2017). Prospective analysis of energy security: A practical life-cycle approach focused on renewable power generation and oriented towards policy-makers. *Applied Energy*, 190, 891-901. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.01.011>
- Geers, K. (2010). The challenge of cyber attack deterrence. *Computer Law & Security Review*, 26(3), 298-303. <https://doi.org/10.1016/j.clsr.2010.03.003>
- Glynn, J., Chiodi, A., & Ó Gallachóir, B. (2017). Energy security assessment methods: Quantifying the security co-benefits of decarbonising the Irish Energy System. *Energy Strategy Reviews*, 15, 72-88. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2016.11.005>
- Guillon, H. (1960). Índices e indicadores. *Tercera época*, 4(1-2-3-4), 9-23.
- IAEA. (2008). *Energy Indicators for Sustainable Development: Guidelines and Methodologies*.
- IDEAM. (2016). *El Niño continua en su fase de mayor intensidad*. Recuperado de <http://www.ideam.gov.co>
- IEA. (2001). *Towards a sustainable energy future*. OECD Publishing. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1787/9789264193581-en>
- IEA (Ed.). (2015). *World energy outlook 2015*. Paris: OECD.
- Institute for 21st Century Energy. (2013). *Index of U.S energy security risk*. Recuperado de <https://www.globalenergyinstitute.org/sites/default/files/pdf/2013-esri.pdf>

- Kim, H., Shin, E., & Chung, W. (2011). Energy demand and supply, energy policies, and energy security in the Republic of Korea. *Energy Policy*, 39(11), 6882-6897. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.07.056>
- Kisel, E., Hamburg, A., Härm, M., Leppiman, A., & Ots, M. (2016). Concept for Energy Security Matrix. *Energy Policy*, 95, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.04.034>
- Kruyt, B., Vuuren, D. P., Vries, H., & Groenenberg, H. (2009). Indicators for energy security. *Energy Policy*, 37(6), 2166-2181. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.02.006>
- Larsen, E., Osorio, S., & Van Ackere, A. (2016). A Framework to Evaluate Security of Supply in the Electricity Sector. Recuperado de https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2858219
- Liu, J. (2015). *Progress Toward Sustainable Energy 2015: Global Tracking Framework Report*. World Bank Publications. Recuperado de [http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=cHQsCgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR6&dq=%22acceleration+in+progress+relative+to+what%22+%22World+Bank+Global+Electrification+database+2015%3B+IEA,+UN,+and+WDI+data+\(2014\)%3B+analysis+by+the+International+Renewable+Energy+Agency+based%22+&ots=HAWsJfpwo8&sig=gM3o1zR19WsRTIACdl-ZKF7Bws](http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=cHQsCgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR6&dq=%22acceleration+in+progress+relative+to+what%22+%22World+Bank+Global+Electrification+database+2015%3B+IEA,+UN,+and+WDI+data+(2014)%3B+analysis+by+the+International+Renewable+Energy+Agency+based%22+&ots=HAWsJfpwo8&sig=gM3o1zR19WsRTIACdl-ZKF7Bws)
- López, C. A. G. (2016). Ucrania, Rusia y los flujos energéticos. *Economía Informa*, 397, 127-138. <https://doi.org/10.1016/j.ecin.2016.03.009>
- Löschel, A., Moslener, U., & Rübelke, D. T. G. (2010). Indicators of energy security in industrialised countries. *Energy Policy*, 38(4), 1665-1671. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.03.061>
- Maya, G., Castro, R., Lobo, A., Ordóñez, A., Sandoval, J., & Mercado, D. (2010). *Estatus de la recuperación mejorada de petróleo en Colombia* (p. 4). Recuperado de <http://oilproduction.net/reservorios/eor/item/400-estatus-de-la-recuperacion-mejorada-de-petroleo-en-colombia>
- MinMinas. (2016, noviembre). Llegó a Colombia primera terminal de regasificación de Gas Natural Licuado. Recuperado de <https://www.minminas.gov.co/historico-de-noticias?idNoticia=23832852>
- MinMinas. Resolución 40006 (2017). Recuperado de <https://www.minminas.gov.co/documents/10180//23517//37343-Resoluci%C3%B3n-40006-4Ene2017.pdf>
- MinMinas, & Ecopetrol. (2016). Ministerio de Minas y Energía y Ecopetrol informan sobre importación de gas de Venezuela. Recuperado de <http://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/nuestra-empresa/sala-de-prensa/boletines-de-prensa/Boletines%202015/Boletines%202015/importacion-gas-Venezuela>
- Naill, R. F. (1975). Managing the discovery life cycle of a infinite resource: A case of study of U.S. natural gas., 145.
- Narula, K., Sudhakara Reddy, B., Pachauri, S., & Mahendra Dev, S. (2017). Sustainable energy security for India: An assessment of the energy supply sub-system. *Energy Policy*, 103, 127-144. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.01.001>
- Nelson, W. . (1960). How complexity of a refinery affects costs of processing,. *Oil & Gas Journal*.
- Olaya, Y., & Dyer, I. (2005). Modelling for policy assessment in the natural gas industry. *Journal of the Operational Research Society*, 56(10), 1122-1131. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601895>

- Osorio, S., van Ackere, A., & Larsen, E. (2016). Interdependencies in Security of Electricity Supply. Recuperado de https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2871943
- Pan, L., Liu, P., & Li, Z. (2017). A system dynamic analysis of China's oil supply chain: Over-capacity and energy security issues. *Applied Energy*, 188, 508-520. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.036>
- Pidd, M. (1999). Just Modeling Through: A Rough Guide to Modeling. *Interfaces*, 29(2), 118-132. <https://doi.org/10.1287/inte.29.2.118>
- Ponzo, R., Dyner, I., Arango, S., & Larsen, E. R. (2011). Regulation and development of the Argentinean gas market. *Energy Policy*, 39(3), 1070-1079. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.11.009>
- Presidencia de la República. (2016). En visita a Guatapé pedí a EPM acelerar reparación de la central hidroeléctrica: Presidente Santos. Recuperado de <http://es.presidencia.gov.co/noticia/En-visita-a-Guatape-pedi-a-EPM-acelerar-reparacion-de-la-central-hidroelectrica-Presidente-Santos>
- Promigas. (2016). *Informe del sector gas natural 2016- Cifras 2015 (No. XVII)* (No. XVII). Recuperado de www.promigas.com
- Promigas. (2017). *Informe del sector gas natural 2017 - Cifras 2015 (No. XVIII)*. Promigas.
- Radovanović, M., Filipović, S., & Pavlović, D. (2017). Energy security measurement – A sustainable approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 1020-1032. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.02.010>
- Schaffernicht, M. (2008). Indagación de situaciones complejas mediante la dinámica de sistemas, 58.
- Smith, J. L. (2009). World Oil: Market or Mayhem? *Journal of Economic Perspectives*, 23(3), 145-164. <https://doi.org/10.1257/jep.23.3.145>
- Sovacool, B. K., & Brown, M. A. (2010). Competing Dimensions of Energy Security: An International Perspective. *Annual Review of Environment and Resources*, 35(1), 77-108. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-042509-143035>
- Sterman, J. D. (2000). *Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world* (Nachdr.). Boston: Irwin/McGraw-Hill.
- Sterman, J. D. (2002). All models are wrong: reflections on becoming a systems scientist. *System Dynamics Review*, 18(4), 501-531. <https://doi.org/10.1002/sdr.261>
- Su, M., Zhang, M., Lu, W., Chang, X., Chen, B., Liu, G., ... Zhang, Y. (2017). ENA-based evaluation of energy supply security: Comparison between the Chinese crude oil and natural gas supply systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 888-899. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.131>
- Tongsopit, S., Kittner, N., Chang, Y., Aksornkij, A., & Wangjiraniran, W. (2016). Energy security in ASEAN: A quantitative approach for sustainable energy policy. *Energy Policy*, 90, 60-72. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.11.019>
- UPME. (2015a). *Balance de Gas Natural en Colombia 2015-2024* (p. 26). Recuperado de http://www1.upme.gov.co/sites/default/files/BALANCE_GAS%20NATURAL_Agosto_2015.pdf
- UPME. (2015b). *Balance Energético Colombiano*. UPME. Recuperado de <http://www1.upme.gov.co/InformacionCifras/Paginas/BECOCONSULTA.aspx>
- UPME. (2015c). *Plan Energético Nacional Colombia: Ideario Energético 2050* (p. 184).
- UPME. (2015d). Proyección de Demanda de Energía Eléctrica y potencia máxima en Colombia. Recuperado de

- http://www.siel.gov.co/siel/documentos/documentacion/Demanda/Proyeccion_Demanda_Energia_Electrica_Octubre2015.pdf
- UPME. (2015e). *Proyección de la demanda de gas natural en Colombia*.
- UPME. (2016). Seguridad Energética para Colombia. Recuperado de http://biblioteca.upme.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=2169&query_desc=an%3A%2220%22
- UPME, & CIDET. (2017). Seguridad Energética para Colombia. Presentado en V Congreso CIER de la energía, Medellín.
- Villada, J. G., & Olaya, Y. (2011). *Análisis de la Competencia y Congestión en el Mercado Colombiano de Gas Natural por Medio de Simulación*. Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Wang, Q., & Zhou, K. (2017). A framework for evaluating global national energy security. *Applied Energy*, 188, 19-31. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.116>
- WEC. (2014). Consejo Mundial de Energía. Recuperado de https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2014/04/WEC_16_page_document_21.3.14_ES_FINAL.pdf
- WEC. (2016). Country Profile. Recuperado de <https://trilemma.worldenergy.org/#!/country-profile?country=Colombia&year=2016>
- WEC. (2017). *Energy Trilemma Index*. World Energy Council. Recuperado de <https://trilemma.worldenergy.org/>
- Winzer, C. (2011). Conceptualizing Energy Security. *EPRG Working Paper*, (1123), 37.
- World Energy Forum. (2017). *Energy Architecture Performance Index*. World Energy Forum. Recuperado de http://www3.weforum.org/docs/WEF_Energy_Architecture_Performance_Index_2017.pdf
- Xiao, J., Cheng, J., Shen, J., & Wang, X. (2017). A System Dynamics Analysis of Investment, Technology and Policy that Affect Natural Gas Exploration and Exploitation in China. *Energies*, 10(2), 154. <https://doi.org/10.3390/en10020154>
- Yao, L., & Chang, Y. (2014). Energy security in China: A quantitative analysis and policy implications. *Energy Policy*, 67, 595-604. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.12.047>
- Yergin, D. (1988). Energy Security in the 1990s. *Foreign Affairs*, 67(1), 110-132. <https://doi.org/10.2307/20043677>
- Yergin, D. (1991). *The epic quest for oil, money and power*.